

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B 2341 - Strojírenství



Studijní obor: 2301R022 Stroje a zařízení

Zaměření: Sklářské stroje

Chlazení termovizní kamery

(Thermovisual camera's cooler)

KSR - 1707

David FIKAR

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. František Novotný, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Ivo Matoušek, Ph.D.

Rozsah bakalářské práce:

Počet stran: 49

Počet tabulek: 10

Počet obrázků: 16

Počet výkresů: 11

Počet příloh: 0

Počet modelů: 0

Datum odevzdání: 28. 5. 2010

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

TÉMA: Chlazení termovizní kamery

Anotace:

Cílem bakalářské práce je návrh konstrukčního řešení chladicího boxu termovizní kamery Flir. Vzhledem ke konstrukci kamery je velice problematické její použití v extrémních podmínkách, ve kterých se provádí termovizní diagnostika. Box by měl sloužit zejména k omezení vysoké teploty a prašnosti. V práci je uvedeno několik možných druhů chlazení včetně jejich kladů a záporů. Nejvhodnější varianta, Peltierův článek, která byla vybrána, je dále podrobněji popsána a využita k tvorbě samotného konstrukčního zpracování chladicího boxu. Technické výkresy sestavy boxu jsou přiloženy k práci.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Chladicí box, teplota, termovizní kamera, Peltierův článek

THEME: Thermovisual camera's cooler

Annotation:

The aim of my bachelor's thesis is to propose a constructive solution to a thermovisual camera Flir's cooler. Considering the camera's construction, it is very problematic to use it in extreme conditions, in which the thermovisual diagnostics is executed. In particular, the cooler is supposed to serve to limit high temperatures and dust nuisance. Several possibilities of cooling are mentioned in the thesis, with both their advantages and disadvantages described. The optimal option, Peltier's element, is described in greater detail and eventually used for a real construction of the cooler. Technician drawings of the cooling set are attached to the thesis.

KEY WORDS:

Cooler, temperature, thermovisual camera, Peltier's element

P r o h l á š e n í

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 -školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 28. 5. 2010

Podpis:

Poděkování

Děkuji panu *Doc. Ing. Františku Novotnému, CSc.* a *Ing. Ivo Matouškovi, Ph.D.* z Katedry sklářských strojů a robotiky Technické univerzity v Liberci za odborné vedení, cenné připomínky a trpělivost v průběhu řešení této bakalářské práce.

Také bych rád poděkoval své rodině za podporu během studia.

David Fikar

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| 1. ROZBOR MOŽNOSTÍ VYUŽITÍ BEZDOTYKOVÝCH METOD MĚŘENÍ | |
| TEPLOT..... | 10 |
| 1.1. Teoretický základ měření teplot | 10 |
| 1.1.1. Dotykové teploměry..... | 10 |
| 1.1.2. Bezdotykové teploměry | 11 |
| 1.2. Bezdotykové měření teplot..... | 11 |
| 1.2.1. Základní pojmy | 11 |
| 1.2.2. Vlastnosti bezkontaktního měření..... | 13 |
| 1.3. Bezdotykové zařízení pro měření teplot..... | 14 |
| 1.3.1. Pyrometry..... | 14 |
| 1.3.2. Čárové skenery..... | 15 |
| 1.4. Termovize | 15 |
| 1.4.1. Detektory v termovizních kamerách..... | 15 |
| 1.4.2. Chlazení detektoru | 16 |
| 1.4.3. Rozlišení snímané plochy | 17 |
| 1.4.4. Identifikace faktorů ovlivňujících přesnost měření | 17 |
| 1.4.5. Parametry termovizní kamery Flir SC 660 | 18 |
| 2. ANALÝZY MOŽNOSTÍ CHLAZENÍ TERMOVIZNÍ KAMERY | 20 |
| 2.1. Teorie šíření tepla | 20 |
| 2.1.1. Vedení..... | 20 |
| 2.1.2. Proudění | 21 |
| 2.1.3. Sálání..... | 22 |
| 2.2. Systémy s externím zdrojem chlazení | 22 |
| 2.2.1. Chlazení vzduchem..... | 22 |
| 2.2.2. Chlazení vodou | 23 |
| 2.2.3. Peltierův termoelektrický článek | 23 |
| 2.2.4. Tepelná trubice - Heatpipe..... | 25 |
| 2.2.5. Absorpční chlazení..... | 25 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3. Systémy s interním zdrojem energie | 25 |
| 2.3.1. Suchý led..... | 25 |
| 2.3.2. Chladicí sprej | 26 |
| 2.4. Rozhodovací analýza prvků chladicího boxu | 26 |
| 2.4.1. Ovládání kamery..... | 26 |
| 2.4.2. Chladicí zařízení | 27 |
| 2.4.3. Infračervený průzor..... | 30 |
| 3. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ CHLADICÍHO BOXU..... | 35 |
| 3.1. Výpočet tepelné ztráty a potřebného chladicího výkonu..... | 37 |
| 3.2. Peltierův článek | 38 |
| 3.3. Chladiče a větráky | 41 |
| 3.4. Materiál konstrukce | 42 |
| 3.5. Zdroj elektrické energie..... | 43 |
| 3.6. Izolační návlek..... | 44 |
| 3.7. Technická příprava boxu | 44 |
| 4. ZHODNOCENÍ PŘÍNOSU | 45 |
| 4.1. Technické hodnocení | 45 |
| 4.2. Ekonomické hodnocení | 45 |

Seznam zkratek a symbolů

| <i>Označení</i> | <i>Jednotky</i> | <i>Název veličiny</i> |
|-----------------|--|--------------------------------|
| T | K | teplota, Kelvinova stupnice |
| t | °C | teplota, Celsiova stupnice |
| σ | $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ | Stefan- Boltzamanova konstanta |
| α | - | spektrální pohltivost |
| ρ | - | spektrální odrazivost |
| τ | - | spektrální propustnost |
| ε | - | emisivita |
| λ | μm | vlnová délka |
| Q | J | teplo |
| S | m^2 | plocha |
| Φ | W | tepelný tok |
| K | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ | součinitel přestupu tepla |
| ΔT | K | teplotní spád |
| n | - | index lomu |
| E | Pa | Youngův modul pružnosti v tahu |
| HK | - | Tvrdost dle Knoop |
| λ | $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | součinitel tepelné vodivosti |

ÚVOD

Tématem bakalářské práce je návrh konstrukčního řešení chladicího boxu pro termovizní kameru FLIR SC 660. Kamera je plně funkční do teploty 50°C. Při teplotě 90°C dochází k nevratnému poškození Germaniového čipu uvnitř kamery. Ve sklářských provozech je běžná teplota 40-60°C a v blízkosti tavicího agregátu dále stoupá až k hodnotě 100°C. Z daných důvodů je nutné navrhnout chladicí box pro termovizní kameru, aby bylo možné snímat teplotní pole v nejexponovanějších místech provozu, bez poškození kamery.

Bakalářská práce v první kapitole uvádí možné principy měření teplot s důrazem na bezkontaktní způsoby měření. Nejprve jsou zde popsány vlastnosti bezkontaktního měření a dále jsou uvedeny faktory ovlivňující výsledky. V případě potřeby přesného měření je nutné eliminovat negativní vlivy nastavením měřicího zařízení. Po přehledu principů měření teplot je podrobněji popsáno termovizní snímání teplotních polí.

V kapitole dvě se práce zabývá základními problémy návrhu boxu s akcentem na výběr chladicího média. Jsou zde uvedeny i teoretické vlastnosti šíření tepla, potřebné k pochopení problematiky jednotlivých chladících medií a jejich způsobu odvodu tepla. Pomocí rozhodovací analýzy byl vybrán nejvhodnější chladicí princip boxu – Peltierův článek.

Třetí kapitola je věnována konstrukčnímu zpracování. Jsou zde uvedeny vlastnosti použitých komponent, které dotvářejí celý návrh chladicího boxu. Dále jsou zde popsány hlavní části boxu, na které navazují oddíly jednotlivých popisů součástí. Kritéria výběru jednotlivých prvků boxu jsou zde uvedena stejně tak jako jejich základní popis a důvod jejich výběru.

Na závěr nelze opomenout celkové zhodnocení přínosu boxu a shrnutí možností jeho použití.

1. ROZBOR MOŽNOSTÍ VYUŽITÍ BEZDOTYKOVÝCH METOD MĚŘENÍ TEPLOT

1.1. Teoretický základ měření teplot

Teplota udává míru kinetické energie neuspořádaného pohybu částic látky za stavu termodynamické rovnováhy. Za nejnižší teploty, označované jako absolutní nula, ustane neuspořádaný pohyb částic. Teplota je nejčastěji definována jako termodynamická veličina, jejíž jednotkou je Kelvin (K), což je 273,16 díl teplotního rozdílu mezi absolutní nulou (0 K) a teplotou trojného bodu vody. Dále teplotu uvádíme v Celsiově stupnici, jejíž jednotkou je stupeň Celsia (°C), která je pouze posunuta vzhledem k termodynamické teplotě. Posun se provádí dle vztahu:

$$T (K) = 273,15 + t (°C)$$

V praxi jsou zavedeny mezinárodní teplotní stupnice (ITS), které odpovídají fázovým rovnováhám vybraných čistých látek za daných teplot. Při měření teplot, se měří jiná veličina, která je na teplotě závislá. Dle dané veličiny se vyjadřuje výsledná teplota.

1.1.2. Dotykové teploměry

Teploměry dilatační:

- Plynové (tlakové) - využívají změny tlaku, teplotní rozsah použití od 5°C do +500°C
- Bimetalové (kovové) - využívají teplotní roztažnosti kovů, teplotní rozsah použití od 0°C do +900°C
- Kapalinové - využívají změny objemu kapalin, teplotní rozsah použití od -200°C do +750°C
- Tenzní - využívají závislosti tenze par na teplotě, teplotní rozsah použití od -40°C do +400°C

Teploměry elektrické:

- Termoelektrické - využívají termoelektrického jevu (Seebeckova jevu), teplotní rozsah použití od -200°C do + 1600°C
- Odporové kovové - využívají změny elektrického odporu, teplotní rozsah od -220°C do +1100°C
- Odporové polovodičové - využívají změny elektrického odporu, teplotní rozsah od -100°C do + 400°C

Speciální teploměry

- Teploměrná tělíska - využívají definovaného bodu měknutí dané hmoty, teplotní rozsah od +100°C do +1600°C
- Teploměrné barvy - využívají změny barvy teploměrného indikátoru, teplotní rozsah od + 40°C do +1350°C

1.1.3. Bezdotykové teploměry

- Širokopásmové pyrometry (radiační) - využívají měření v širokém rozsahu vlnových délek, teplotní rozsah od -5°C do $+5000^{\circ}\text{C}$
- Jednopásmové pyrometry (spektrální)- využívají měření úzkého rozsahu vlnových délek, teplotní rozsah měření od $+700^{\circ}\text{C}$ do 3600°C
- Termovize- využívají emise infračerveného záření, teplotní rozsah použití od -30°C do 1200°C

V technické praxi jsou nejčastěji používanými měřidly teploty: termočlánky, odporové teploměry, termistory, termovize, bimetalové teploměry, kapalinové teploměry a teploměry se změnou stavu. [1]

- Termočlánky jsou složeny ze dvou kovů, spojených na jednom konci a mezi dvěma volnými konci vzniká termoelektrická síla, která je nelineárně závislá na změně teploty.
- Odporové teploměry využívají k měření teplot změny elektrického odporu materiálu, který je závislý na teplotě.
- Termistory využívají princip změny odporu v keramickém polovodiči.
- Termovize, termometry jsou bezdotykové snímače odvozující teplotu od množství vyzařené energie tělesem.
- Kapalinové teploměry se používají rtuťové nebo s organickou náplní, rtuť je velmi škodlivá k životnímu prostředí, proto jsou pro práci s ní zavedena velmi přísná pravidla. Samotné měření je jednoduché, stabilní a nevyžaduje elektrické napájení.
- Teploměry se změnou stavu - nejčastěji využívanými snímači jsou nálepky, peletky, laky nebo tekuté krystaly. Daná teplota se projeví změnou stavu na měřidlech. Změny stavu jsou nevratné, kromě použití tekutých krystalů, a probíhají v řádu několika minut.

1.2. Bezdotykové měření teplot

Termometry jsou teploměry vhodné pro měření vysokých teplot, využívající infračerveného záření emitovaného povrchem těles.

1.2.1. Základní pojmy

IR záření je součástí elektromagnetického spektra, které se dále dělí na několik pásem dle vlnových délek. Toto záření je emitováno každým tělesem s teplotou vyšší než 0 K , vlivem tepelného pohybu částic. V současnosti se samotné IR záření dělí do tří dalších skupin:

- Krátké pásmo ve vlnových délkách $0,76\text{ }\mu\text{m} - 1,4\text{ }\mu\text{m}$
- Střední pásmo ve vlnových délkách od $1,4\text{ }\mu\text{m}$ do $3\text{ }\mu\text{m}$
- Dlouhovlnné pásmo v rozmezí $3\text{ }\mu\text{m} - 100\text{ }\mu\text{m}$
- Dlouhovlnné pásmo přechází do rádiových vln [2]

Bezdotykové měření neprovádí snímání teploty přímo, nýbrž se zpětně dopočítává pomocí zadaných okrajových podmínek, mezi které patří emisivita povrchu, vzdálenost mezi objektem a měřicím přístrojem, relativní vlhkost a teplota vzduchu. Uvedené způsoby měření teplot vychází z fyzikálních zákonů, které ovlivňují výsledné hodnoty a okrajové podmínky.

Stefan-Boltzmanův zákon - Množství zářivého toku je přímo úměrné násobku čtvrté mocniny absolutní teploty tělesa a Stefan-Boltzmanovy konstanty $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

- $E = \sigma T^4$

Pro výpočet přenosu tepla je potřeba znát hodnotu zářivého toku $E[\text{W m}^{-2}]$, která se rozdělí dle prostorového úhlu ω . Proto je zavedena intenzita vyzařování I , která vyjadřuje hodnotu zářivého toku E vyzařenou kolmo k povrchu zářiče.

Wienův posunovací zákon – popisuje posun maximálního množství zářivého toku do pásma kratších vlnových délek s rostoucí teplotou a také rychlejší nárůst intenzity záření na kratších vlnových délkách. Proto nastavujeme rozmezí vlnových délek pro danou teplotu. Při výrazném snížení či zvýšení teploty se posunují vlnové délky vyzařovaného záření mimo danou oblast a přijímač další změnu nezaznamená. [3]

Oba zákony jsou odvozeny pro černé těleso. Ideální černé těleso pohlcující veškeré záření dopadající na jeho povrch a dokonale emitující záření ze svého povrchu. Takových hodnot nedosahuje žádný vyvinutý materiál, nýbrž dochází po dopadu záření na povrch tělesa k pohlcení, odražení či propuštění části záření. Jednotlivé složky jsou závislé na vlnové délce. Pro jejich určení používáme koeficienty:

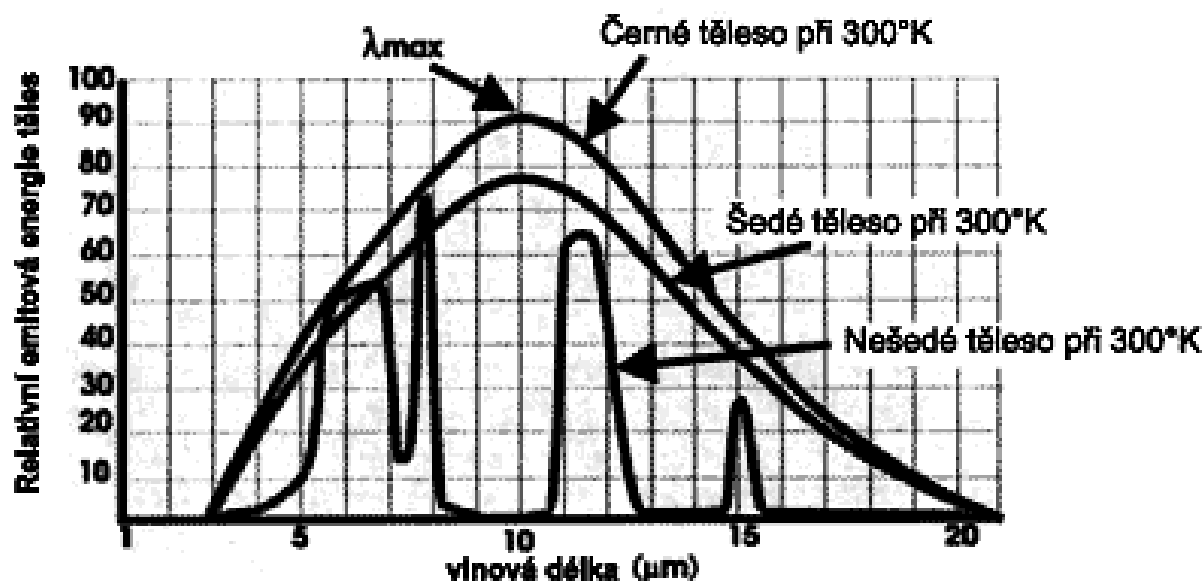
- Spektrální pohltivost α – poměr pohlcené energie tělesem a celkového toku
- Spektrální odrazivost ρ – poměr odražené energie povrchem tělesa a celkového toku
- Spektrální propustnost τ – poměr energie propuštěné tělesem a celkového toku

Pro součet všech tří koeficientu platí:

- $\alpha + \rho + \tau = 1$

Jelikož se vyzařovací schopnost mění s vlnovou délkou záření, je zavedena veličina emisivita ε . Hodnota emisivity vyjadřuje poměr vyzářeného množství energie povrchem tělesa, o určité teplotě a vlnové délce, a množstvím, které by za stejných podmínek vyzářilo černé těleso. Emisivita nabývá hodnot od 0 do 1. Tělesa se rozdělují do skupin dle hodnoty emisivity ε v závislosti na vlnové délce (Obr. 1).

- Černé těleso: $\varepsilon = 1$.
- Šedé těleso: $\varepsilon = \text{konstanta, menší než } 1$.
- Selektivní zářič, ε závislé na vlnové délce. [4]



Obr. 1: *Wienův posunovací diagram* [5]

1.2.2. Vlastnosti bezkontaktního měření

Mezi hlavní výhody použití bezkontaktního měření patří:

- Zanedbatelný vliv na měřený objekt – neodebírání se žádná tepelná energie, jako při dotykovém měření. Hlavně u špatných vodičů tepla (plast, dřevo) nedochází ke zkreslení výsledné hodnoty.
- Žádné mechanické opotřebení měřeného objektu – nepoužívají se žádná čidla na povrchu měřeného objektu.
- Rychlá reakce na změnu teploty – bezdotykové přístroje reagují na změnu teploty v desetinách milisekund.
- Měření vysokých teplot – dokáže zaznamenávat teploty až $+3000^{\circ}\text{C}$.
- Jednoduché měření teplot na pohybujících se a rotujících objektech.
- Jednoduché digitální zpracování teplotních polí – snadné uchovávání a vyhodnocování výsledků měření.
- Možnost provádět měření na nebezpečných a těžko dostupných místech.

Nevýhody bezkontaktního měření jsou:

- Neznalost hodnot emisivity povrchu tělesa. Emisivita je ovlivněna vlnovou délkou záření, teplotou a kvalitou povrchu.
- Nepřesnost měření způsobená znečištěním optiky či stárnutím detektoru.
- Chyby vzniklé neznalostí propustnosti prostředí mezi tělesem a teplotním snímačem. [6]

1.3. Bezdotyková zařízení pro měření teplot

1.3.1. Pyrometry

- **Pyrometry (infračervené radiační termometry)** jsou přístroje, které zachycují a měří tepelnou radiaci emitovanou z povrchu. Optická soustava soustřeďuje emitovanou energii z povrchu tělesa do detektoru citlivého na radiaci. Výstupem z detektoru je hodnota proporcionální k množství energie a k citlivosti detektoru na danou vlnovou délku. Výsledná teplota objektu je odvozena od výstupu z detektoru, ale je také ovlivněna emisivitou a emitencí povrchu tělesa. Jsou to přístroje pracující s infračerveným zářením na vlnových délkách 0,7-20 μm .
- **Úhrnné pyrometry** umožňují měřit tepelné záření v celém spektru vlnových délek.
- **Monochromatické pyrometry** detekují tepelné záření jen v úzkém vlnovém pásmu daném citlivostí optiky. Nejčastěji používají pásmo široké méně než 1 μm . Omezení detekce vlnových délek je vytvořeno pomocí selektivních filtrů. Celý systém tak umožňuje mnohem přesnější měření. Použití vlnové délky 8-14 μm omezuje interferenci s atmosférickou vlhkostí a vlnová délka 5 μm se používá při zkoumání teplotních polí skleněných povrchů.
- **Poměrové pyrometry (dvoubarevné radiační pyrometry)** měří vyzářenou energii na dvou pásmech vlnových délek. Vypočítaná teplota závisí na daném rozdílu energií a nezávisí na jejich konkrétních hodnotách. Tento princip měření vede k přesnějším výsledným hodnotám, eliminuje odchylky způsobené nestejnou emisivitou, povrchovou úpravou a absorpcí záření atmosférickou vlhkostí atd. V některých aplikacích lze využít i poměrové pyrometry s třemi či sedmi vlnovými délkami. Poměrových pyrometrů je využíváno při měření s důrazem na opakovatelnost a přesnost nebo v případech kdy měřený objekt podléhá fyzikálním nebo chemickým změnám.
- **Optické pyrometry** jsou zařízení měřící energii v úzkých vlnových pásmech. Využívají principu, kdy zaměří povrch tělesa a uvnitř pyrometru se žhaví vlákno. Pomocí změny příkonu se mění barva vlákna do doby, kdy dosáhneme barevné shody povrchu a vlákna. Výsledná teplota povrchu je odvozena od hodnot příkonu elektrické energie. Dají se využít i automatické optické pyrometry, v kterých se využívají elektrické detektory. Emitované záření z povrchu tělesa a interního referenčního zdroje je střídavě propouštěno na detektor. Výsledná teplota je odvozena od rozdílu těchto dvou záření. [7]
- **Detektory**
 - **Radiační** – nutností je jejich chlazení, protože jsou citlivé na okolní teploty.
 - **Termální** – jsou zahřívány vstupní radiační energií, kterou absorbují. Mají pomalou odezvu na změnu teploty, z důvodu nutného dosažení termální rovnováhy.
 - **Termoelektrické** – jsou složeny z několika termočlánků seřazených do sériového zapojení.

- **Bolometrické** – pohlcené záření detektorem změni hodnotu odporu na odporovém čidlu, nejčastěji se používají odporové materiály MgO, MnO, TiO₂, NiO.
- **Fotonové** – dochází u nich k uvolnění elektrického náboje v reakci na dopad záření. Výsledné hodnoty se odvozují od změny odporu nebo napětí způsobené uvolněním náboje.
- **Pyroelektrické** – využívají k vyhodnocení výsledků pyroelektrického jevu. [8]

1.3.2. Čárové skenery

Snímají většinou úzký pruh zkoumaného předmětu pomocí rotujícího zrcadla. Které směřuje záření do detektoru. Nejrychlejší skenery jsou schopné pořídit až 500 skenů za sekundu. Výstupem skeneru je 3-D graf závislosti teploty na čase a obraz objektu, pohybujícího se pod detektorem ve falešných barvách dle jejich teplotního rozdělení. Rozmanitost skenerů je závislá na rychlosti skenování, počtu měření na jeden sken a šíři skenování. Skenery jsou velmi citlivé na čistotu prostředí mezi tělesem a detektorem a na čistotu optické soustavy. Pro odstranění těchto problémů mohou mít skenery vzduchové čistící chlazení či přímo vodní chlazení. [9]

1.4. Termovize

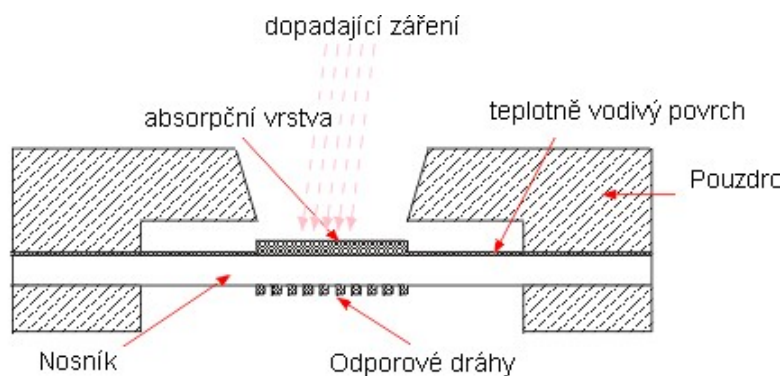
Zařízení podobné stavbou klasickým videokamerám, používáné k 2-D teplotní analýze. Při použití radiometrického zařízení dostane výsledky ve formě obrazu vykresleného ve falešných barvách dle rozdělení teplotních polí a teplotního popisu jednotlivých polí. Zobrazovací zařízení je využíváno v případě pouhého srovnání teplot dvou těles bez teplotních údajů. Povrchy měřených předmětů nám dávají informaci o jejich vlastní teplotě ale i teplotě okolí. Jelikož dochází, zvláště u lesklých povrchů, k odrazu okolního záření. U průhledných těles může docházet ke snímání tepelného objektu v pozadí, čímž jsou ovlivněny konečné výsledky. Některé kamery mají korekční členy pro emisivitu, eliminující nežádoucí jevy. [10]

1.4.1. Detektory v termovizních kamerách

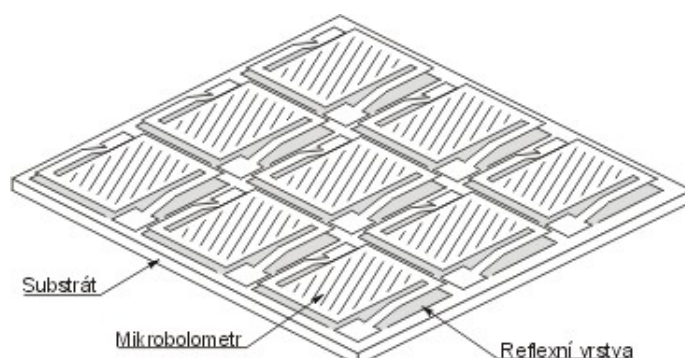
- **Systém s opticko-mechanickým rozkladem obrazu** snímá jednotlivé body (pixely) zorného pole pomocí rotujícího zrcátka a dále je odráží do snímajícího detektoru. Tyto systémy jsou v dnešní době překonané, a proto se již nepoužívají.
- **Systém s maticovým detektorem** nahrazuje zrcátko detektorem umožňující kontinuální snímání celého obrazu. Tento systém zkracuje časovou prodlevu snímání. Obraz se zde zachycuje přímo na snímací zařízení. Používanými detektory jsou mikrobolometrické a kvantové FPA detektory, s nezbytným chlazením.

Bolometry, (obr. 2) jsou senzory využívající pyrometrického principu. Využívají změny elektrického odporu v závislosti na teplotě, která mění své hodnoty podle množství dopadajícího infračerveného záření. Pro správnou funkci bolometru musí být tepelně izolován od okolí.

Mikrobolometry se skládají až z tisíce miniaturních bolometrů (Obr.3). Na povrchu je teplotně citlivý odporový materiál, který zachycuje infračervené záření. Každému bolometru je přiřazen spínací senzor, který snímá hodnoty odporu a odesílá je do řídicího systému, který vyhodnocuje výsledky měření. Řídicí systémy jsou velmi podobné CCD snímačům používaných v běžných kamerách. [5]



Obr. 2: *Jednoduchý bolometr* [6]



Obr. 3: *Detailní pohled mikrobolometru* [6]

1.4.2. Chlazení detektoru

Přílišné množství infračerveného záření z povrchu detektoru by ovlivňovalo výsledky měření, účinné chlazení tento jev eliminuje. Chlazení je realizováno pomocí Stirlingova nebo termoelektrického chladiče. Nejpřesnější hodnoty jsou dosaženy při konstantní teplotě detektoru.

- **Stirlingův chladič** využívá uzavřeného termodynamického cyklu (zahřátí při konstantním objemu, izotermická expanze, chlazení při konstantním objemu a izotermická komprese), pro získání mechanické práce, která je dále využita k vytvoření chladicího efektu. Ochlazení a ustálení detektoru na provozní teplotu trvá přibližně 5 minut, proto nemůžeme snímat ihned po zapnutí kamery.
- **Termoelektrický chladič** využívá k chlazení Peltierova jevu.
- **Nechlazené detektory** jsou možností náhrady stávajících většinově rozšířených detektorů.

1.4.3. Rozlišení snímané plochy

- **Prostorové rozlišení** využívá detektoru, který je složen z mnoha optických čipů a každý z nich snímá určitý bod na měřeném tělese. Kamera tak umožňuje rozlišit teplotu dvou těsně sousedících malých bodů
- **Teplotní rozlišení** odděluje od sebe body s rozdílnou teplotou, nesnímá předem zaměřené body. [11]

1.4.4. Identifikace faktorů ovlivňujících přesnost měření

Vlastnosti termovizní kamery lze shrnout do těchto bodů:

- Teplotní rozlišení je až 0,045 °C (při 30 °C).
- Rozsah měřených teplot -50 °C až +500°C , při použití filtru do +2000°C
- Nejčastěji používaný rozsah vlnových délek je 7,5 μm až 15μm.

Přesnost měření je ovlivněna různými faktory, které se dají eliminovat pomocí nastavení kamery. Mezi nežádoucí faktory řadíme:

- **Emisivitu povrchu** – významně ovlivňuje hodnotu vyzářeného množství energie z povrchu tělesa. Hodnoty emisivity se určují pomocí:
 - Tabulek emisivity – takto určené konstanty jsou ovlivněny kvalitou povrchu. Kvalita souvisí se způsobem obrobění povrchu, odolností proti korozi zvláště u kovů.
 - Měření emisivity vzorku – hodnota emisivity se stanoví ze vzorku, vyhřátého na známou teplotu. Na kameře se mění hodnota emisivity do doby srovnání teplot naměřené a reálné. Nastavená hodnota emisivity je v tomto případě mnohem přesnější, než v předchozím případě.
- **Neznalost propustnosti prostředí mezi měřeným objektem a kamerou** - při dálkovém snímání objektů může docházet k absorpci či rozptylu infračerveného záření na molekulách plynu, částicích kouře či kapkách vody. Ve venkovních prostorech dochází k ovlivnění propustnosti větrem, deštěm či sněžením.
- **Neznalost množství odraženého záření** – okolní prostředí ovlivňuje teplotu povrchu v závislosti na hodnotách reflexe a absorpce. Dané hodnoty ovlivňují skutečnou povrchovou teplotu nebo zdánlivou povrchovou teplotu.
- **Nastavení vzdálenosti snímače a předmětu** – takové chyby se předchází správným nastavením vzdálenost.

Při pořizování teplotních snímků termovizní kamerou musíme nastavit emisivitu daného tělesa, vzdálenost mezi kamerou a objektem, teplotu okolí a relativní vlhkost, abychom dostali co nejpresnější výsledky. Dále si při měření musíme vybírat vhodné pohledy zobrazení, aby nedocházelo k odrazu záření z vedlejších zdrojů. [12]

1.4.5. Parametry termovizní kamery Flir SC 660



Obr.4: Termovizní kamera: Flir SC 660 [13]

Technické parametry kamery:

- **Zobrazovací zařízení:**

- Detektor – nechlazený mikrobolometr 640 x 640 pixelů.
- Spektrální rozsah – 7,5 – 13 μm .
- Ostření – automaticky, elektronicky a manuálně.
- Teplotní rozlišení – 0,045°C při 30°C.

- **Měření:**

- Teplotní rozsah – od -40°C do 1500°C, ve 3 nastavitelných rozsazích.
- Přesnost měření - $\pm 1^\circ\text{C}$ nebo $\pm 1\%$.
- Korekce emisivity – od 0,01 do 1,0 .
- Korekce měření - automatická korekce v závislosti na relativní vlhkosti, atmosférické propustnosti, množství odraženého světla.

- **Obrazové funkce, paměť:**

- Paměť – vyměnitelná SD karta, vnitřní RAM.
- Ukládání – každých 10 sekund z RAM na SD kartu.
- Formát souboru – JPEG.
- Lokace – připojení GPS souřadnic k obrazu.

- **Video nahrávání:**

- Formát souboru – MPEG 4.
- Paměť – ukládání do interní RAM.

- **Provozní podmínky:**

- Operační teplota – od -15°C do 50°C.

- Skladovací teplota – od -40°C do 70°C.
- Vlhkost – od 10% do 95%.
- Stupeň krytí - IP54.
- **Vlastnosti**
 - Hmotnost – 1,8 kg
 - Rozměry – 325 x 144 x 147 mm

[13]

2. ANALÝZA MOŽNOSTÍ CHLAZENÍ TERMOVIZNÍ KAMERY

Základní požadavky na chlazení jsou :

- Účinnost – snížení teploty nejméně o 50°C, vůči teplotě okolí (100°C)
- Vlhkost – zamezení kondenzace vody v prostoru kamery.
- Energie – optimalizace energetické náročnosti zařízení.
- Hmotnost – vhodný poměr mezi hmotnostmi chladicí soustavy a její účinnosti.
- Regulace – nastavení teploty uvnitř boxu v závislosti na teplotě okolí.

Dělení chladicích medií, dle zdroje chladicí energie:

- Systémy s externím zdrojem chlazení
- Systémy s interním zdrojem chlazení.

2.1. Teorie k šíření tepla

Principy šíření tepla jsou:

- Vedení (kondukce)
- Proudění (konvekce)
- Sálání (radiace)

2.1.1. Vedení

Představuje pohyb tepla pevnou, plynnou či klidovou kapalnou fází hmoty způsobený rozdílnou teplotou. Dochází k vedení tepla od teplejšího k chladnějšímu místu v hmotě. Dle kinetické teorie tepla představuje vedení mikropohybu molekul hmoty.

Izotermická plocha, je určena všemi body se stejnou teplotou. Teplotní gradient, grad T [$K \cdot m^{-1}$], vyjadřuje vzrůst teploty ve směru normály k izotermické ploše. Rovnice vyjadřující gradient teploty:

- $grad\ T = \frac{dT}{dh}$

Kde dT je přírůstek teploty a dh přírůstek šíře stěny.

Teplotní spád vyjadřuje pokles teploty ve směru normály k izotermické ploše.

- $-grad\ T = -\frac{dT}{dh}$

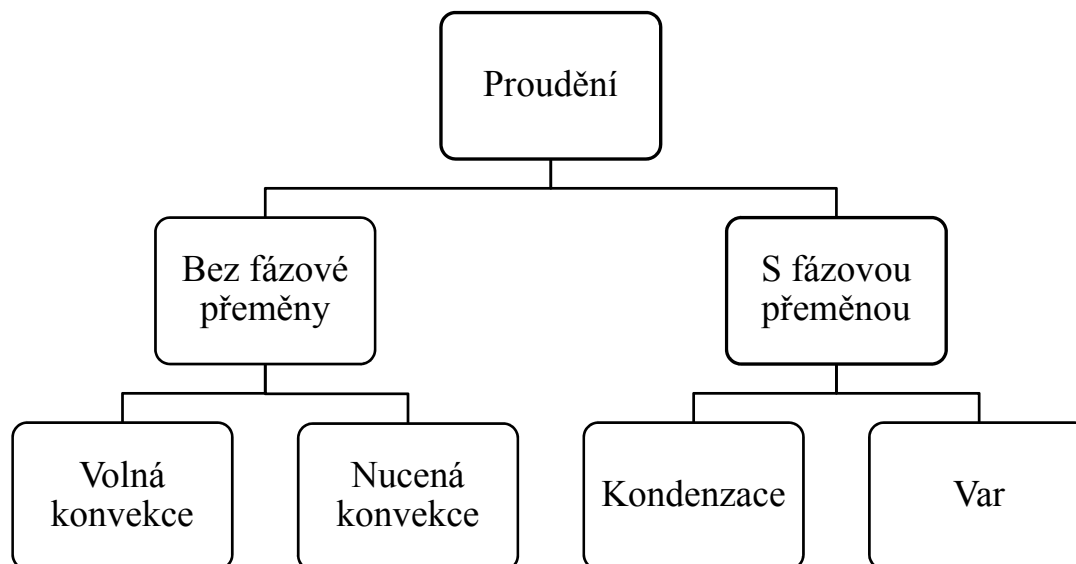
Množství tepla, procházející plochou S [m^2], za čas τ [s], vyjadřuje Fourierův zákon :

- $Q = -\lambda \cdot gradT \cdot S \cdot \tau \quad [J]$

Součinitel úměrnosti ve Fourierově rovnici je λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$], nazývaný se tepelná vodivost. Součinitel vyjadřuje schopnost vést teplo. V případě kapalně a pevné fáze je součinitel tepelné vodivosti nezávislý na změně tlaku. U fáze plynné je závislý na změně teploty a tlaku. [14]

2.1.2. Proudění

Je způsobeno přestupem tepla mezi stěnou tělesa a obklopující kapalinou či plynem. V případě kdy má těleso vyšší teplotu, než okolní medium dochází k zředění hustoty částic média, v blízkém okolí stěny. Vlivem rozdílných hustot dochází k pohybu částic. Teplejší částice s nižší hustotou stoupají vzhůru od povrchu tělesa. V případě chladnějšího tělesa je efekt chladícího média na těleso opačný.



Obr. 5: Rozdělení proudění

Proudění vyvolané pouze rozdílnou hustotou částic, se nazývá volná konvekce. Naopak nucená konvekce nastává v případě použití pomocného zařízení, které uvádí plyn či kapalinu do pohybu.

Tepelný tok Φ [W], který projde za časovou jednotku mezi povrchem tělesa a obklopujícím mediem závisí na hodnotách ponořené plochy tělesa S [m²], součinitele přestupu tepla K [W·m⁻²·K⁻¹] a teplotním spádu v mezní vrstvě tekutiny ΔT [K] podle rovnice:

$$\Phi = K \cdot S \cdot \Delta T$$

Hodnota tepelného toku je nepřímo ovlivněna způsobem proudění a tvarem povrchu tělesa.

Var představuje změnu skupenství z kapalného na plynné. Změna se uskutečňuje na výhřevné ploše v případě přehřátí kapaliny nad teplotu změny skupenství. Lze rozeznávat dva druhy přeměny, dle velikosti přehřátí a charakteru změny plynné fáze.

- Bublínkový var – charakteristickým rysem je tvorba parních bublinek v důsledku lokálního zvětšení teplosměnné plochy na mikronerovnostech povrchu. Tento var probíhá v rozmezí teplot výhřevné plochy 106 – 130°C.
- Blánový var – se uskuteční v případě pokrytí výhřevné plochy vrstvou přehřáté páry, která izoluje vroucí kapalinu. Takový druh varu není účinnější než bublínkový, z důvodu nerostoucího součinitele přestupu tepla.

Kondenzace se podobně jako var dělí dle vrstvy kondenzátu na ochlazovací ploše na dva druhy.

- Blánová kondenzace – nastává v případě použití smáčivé kapaliny, vytvářející souvislou vrstvu na ochlazovací ploše.
- Kapičková kondenzace – nastává v případě nesmáčivé kapaliny tvořící kapičky na ochlazeném povrchu.

2.1.3. Sálání

Je uskutečněno pomocí vlnění, které se po dopadu přeměňuje na teplo.

Po dopadu záření na těleso lze popsat tři možné jevy:

- Propuštění tepelného záření
- Odražení tepelného záření
- Pohlčení tepelného záření [15]

2.2. Systémy s externím zdrojem chlazení

Tento systém je charakterizován zdrojem energie umístěným mimo chladicí box. Použití takového systému je podmíněno zajištěním snadného přístupu ke zdroji energie a transportu energie ze zdroje k boxu.

2.2.1. Chlazení vzduchem

Patří mezi základní způsoby chlazení. Jako zdroj chlazeného vzduchu by mohly sloužit centrální rozvody. Při průchodu vzduchu velmi dlouhým vedením, dochází k jeho ohřevu a v extrémních případech se pohybuje teplota výstupního vzduchu až na hranici 60°C. Proto by muselo docházet k ochlazení vzduchu těsně před vstupem do boxu. Další možností je použití externího zdroje chlazeného vzduchu, který by byl součástí navrženého zařízení. Vhodným příkladem chlazení je využití chladicích medií počítačové techniky.

Jednoduché řešení by mohlo být realizováno pomocí nuceného proudění vzduchu o nižší teplotě v okolí kamery, při kterém by docházelo k výměně teplého vzduchu za chlazený. Teplý vzduch tak odchází přes výfuky, vyplněnými filtry, zpět do okolí. Takové řešení je zřejmě nejjednodušší na realizaci chladicího boxu.

Daný způsob vyžaduje chlazení či jen předchlazení vzduchu mimo chladicí box. Jako vhodná metoda se nabízí Ranque-Hilschova trubice. Toto zařízení dokáže ochladit vzduch o teplotě 20°C na teploty okolo -40°C. Jelikož centrální stlačený vzduch má teplotu kolem 60°C, výsledná teplota ochlazeného vzduchu by se pohybovala okolo 10 až 20°C, což představuje vhodnou teplotu pro daný účel. Samotná Ranque-Hilschova trubice zaručuje již při malých rozměrech vysokou účinnost chlazení, což umožňuje její napojení v blízkosti boxu, čímž se zabrání opětovnému ohřívání vzduchu ve vedení. Další výhodou je nucený odvod teplého média z prostoru kamery do okolí, nedochází tak k zpětnému vedení média, jako v případě uzavřených systémů. Teplý vzduch, který vychází z volného konce Ranque Hilschovi trubice by odcházel do okolního prostředí. Hlavními přednostmi takového řešení jsou jednoduchost konstrukce boxu, malé rozměry a malá hmotnost.

Za hlavní nevýhodu lze považovat nutnost přívodu vzduchu k boxu, realizovanou tlakovými hadicemi. Toto řešení tak neumožňuje rychlou a jednoduchou manipulaci s kamerou a pohodlné přemísťování mezi jednotlivými pozicemi snímání.

2.2.2. Chlazení vodou

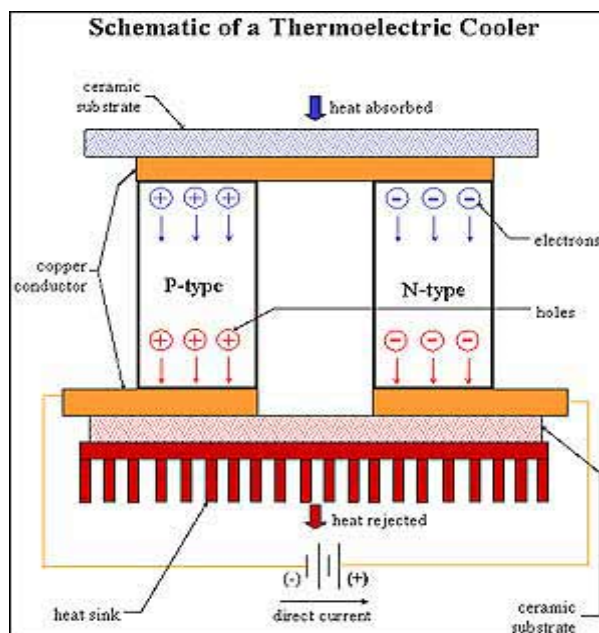
Vodní chlazení odvádí teplo z chlazeného prostoru a přenáší ho skrz medium do radiátoru. Na radiátoru dochází k přenosu tepla okolnímu prostředí. Teplo by se tak odvádělo do teplejšího prostoru, o teplotě 100°C, a nedocházelo by k dostatečnému odvodu tepla.

Jinou volbou s použitím vody jako chladicího media je kombinace externího stálého chlazení vody a vodního bloku, který by odebíral teplo v prostředí boxu. Chladicí blok je možné realizovat pomocí několikrát esovitě ohýbaných trubiček uvnitř boxu, kterými by procházela chladicí kapalina, či využití chladicího radiátoru určeného k chlazení komponentů v počítačích.

Odvod tepla pomocí vody je oproti vzduchovému účinnější díky vyšší tepelné vodivosti. Tepelná vodivost vody je $\lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 0,651 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a vzduchu $\lambda_{\text{vzduch}} = 0,02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Daná metoda vodního chlazení není příliš vhodná, jelikož je nutné zaručit vysokou těsnost boxu, jelikož únik chladicího media by znamenal poškození kamery. Navíc ochlazování vody realizované v chladiči či podobném zařízení, umístěného mimo pozici kamery, klade mnohem větší nároky na tepelnou izolaci rozvodů vody. [16]

2.2.3. Peltierův termoelektrický článek

Funguje na principu průchodu proudu dvěma rozdílnými kovy či polovodiči spojenými do obvodu, při němž dochází k ohřevu jednoho kovu a ochlazení druhého. Jev je založen na uplatnění zákona zachování energie. Při pohybu nosičů náboje dochází ke vzniku rozdílu mezi potencionální energií nosičů náboje v obou kovech. Energetická rovnováha je udržována pomocí tepelné energie, která je následně uvolněna do okolí. Celý systém je realizován ve formě destičky. Vnitřní konstrukce se skládá z několika polovodičů typu P a N. Jednotlivé dvojice vodičů jsou na studené straně modulu propojeny a na teplé straně jsou plošky polovodičů volné (Obr. 6). Účinnost Peltierova modulu je určena množstvím tepla, které musí odvést z chlazeného prostoru. Dle odvedeného množství tepla a vstupního napětí se stanovuje teplotní diference na Peltierově článku. K přenosu tepla dochází pomocí vedení. Celkové přenesené množství je sníženo o hodnotu Jouleova tepla vedeného z teplé na studenou stranu. Zvýšením napětí dochází k zvětšení teplotního rozdílu, a k nárustu Jouleova tepla.



Obr. 6: Schéma Peltierova článku [17]

Výhody Peltierova chlazení:

- Účinnost zařízení, míru přeneseného tepla, lze jednoduše ovládat změnou napětí.
- Pouhou změnou směru stejnosměrného proudu dojde ke změně z chlazení na topení a opačně.
- Nedochozí k opotřebení, přílišné hlučnosti apod., jelikož nemají pohyblivé části.
- Termoelektrický systém může pracovat v jakékoliv pracovní poloze.

Nevýhodou je nižší účinnost, jelikož k významným hodnotám přeneseného tepla, dochází u vyšších hodnot napájecího proudu. Dále je nutné chladit teplou stranu článku, čímž se zamezí zvýšení teploty nad kritickou mez a zničení článku. Nejčastěji používané systémy chlazení jsou

- Žebrovaný chladič ofukovaný ventilátorem
- Žebrovaný chladič bez přídavného ventilátoru – nižší účinnost
- Měděný nebo hliníkový blok chlazený vodou – nejúčinnější řešení

Pro zadané podmínky se nejlépe hodí systém skládající se z více termoelektrických článků doplněných o žebrované chladiče. Takovéto zařízení pracuje na principu výměniku tepla typu vzduch – vzduch. V daném systému je nutné zaručit nucené proudění vzduchu, aby docházelo k účinnějšímu odvodu tepla z žebrovaného chladiče. Teplotu chladicí části článku lze jednoduše ovládat pomocí velikosti napájecího napětí. Neodpadá zde však nezávislost na přívodu elektrické energie, kterou lze realizovat pomocí napájecí baterie či připojení na síť elektrické energie. [18]

2.2.4. Tepelné trubice - Heatpipe

Zařízení s vysokou tepelnou vodivostí, používané k chlazení elektromotorů, plynových turbín apod. Jednoduchý systém připomínající vzhledem běžnou trubici. Tepelná trubice je naplněna pracovní látkou (voda, lithium, čpavek). Na jedné straně je umístěná v chlazeném prostoru a druhá část ústí do chladiče. Pokud teplota stoupne na požadovanou teplotu, dojde k odpařování pracovní látky a zvýšení tlaku v daném místě. Díky tlakovému rozdílu se začne plyn pohybovat ke studenému konci, kde dojde ke kondenzaci páry a odevzdání tepla do okolí. Zpětný transport kondenzátu je zajištěn kapilárními silami, což umožňuje použití heatpipe i v poloze, kdy je kondenzační část níže než výparná. Nastavení výparné teploty se provádí pomocí výběru vhodného materiálu a tlaku v trubici. Maximální hodnota přeneseného tepla je limitována hlavně plošným obsahem trubice a jejími kapilárními schopnostmi.

Použití tohoto druhu chlazení je upřednostňováno jako paralelní k aktivnímu chlazení. Vhodným konstrukčním řešením je použití velké trubice, která zároveň slouží jako část pláště. Takové trubice jsou využívány v kombinaci s vnějším žebrovaným chladičem, který je připevněný přímo na trubici. [19]

2.2.5. Absorpční chlazení

Představuje systém založený na plynném médiu. Chladivo, nejčastěji amoniak, expanduje z roztoku za zvýšené teploty. Páry amoniaku postupují do absorbéru, kde jsou kapalným vodíkem nuceny k odpaření. Při tomto ději se uvolňuje teplo, které je následně odváděné mimo chladicí oběh. Roztok je přemístěn za pomoci čerpadla zpět do absorbéru, kde dochází k oddělení jednotlivých složek a počátku nového cyklu.

Výhodou takového systému je absence pohyblivých částí systému. Velkou nevýhodou je náchylnost na náklon chladicího systému, jelikož při odchylce od rovnovážné polohy dochází k omezení chladicího výkonu. [20]

2.3. Systémy s interním zdrojem energie

Takové systémy představují principy chlazení nezávislé na externích zdrojích energie. V takovém případě odpadá nutnost zajistit vedení chladicího média k boxu. Instalace chladicích zařízení do boxu, ale vede k zvýšení hmotnosti celého systému.

2.3.1. Suchý led

Suchý led je oxid uhličitý v pevné formě. Teplota suchého ledu při daném skupenství je -79°C , taková hodnota je velice odlišná od hodnoty běžného ledu vzniklého zchlazením vody. Další odlišností je chování za běžných podmínek, kdy nedochází k tání, ale přímému vypařování suchého ledu. Při uvedeném ději dochází k značnému uvolnění plynného oxidu uhličitého (CO_2). Výhodou suchého ledu je vysoký chladicí účinek.

Suchý led je upravován do bloků, plátek a granulí. Je nutné jej přepravovat ve speciálních chladicích boxech. Při manipulaci je třeba být obezřetný, jelikož může dojít k popálení. Skladovat by se měl ve větraných místech, aby nedocházelo k přílišnému zaplnění

prostoru CO₂. Uvedené podmínky skladování a zacházení se suchým ledem negativně ovlivňují použití tohoto druhu chladiva.

Použití suchého ledu by zjednodušilo manipulaci s boxem. Velikost boxu by byla ovlivněna pouze množstvím používaného suchého ledu a velikostí izolace. Kvalita izolace a množství chladiva by byly jedinými faktory ovlivňující délku chladicího účinku. Nevýhodou by byla nemožnost pružně reagovat na změnu okolních podmínek, regulaci vnitřní teploty. Box by musel být navíc zkonstruován pro možný únik CO₂. Jelikož z 1 kg suchého ledu se po sublimaci stane 541 l plynu. [21]

2.3.2. Chladicí sprej

Spreje jsou nejčastěji používané k podchlazení strojních součástí, pokud je nutné dosáhnout nejtěsnějšího lícování. Chladicí teplota je na úrovni – 45°C. Navíc nezanechává po odpaření žádné stopy.

Použití spreje vykazuje velmi vysoký chladicí účinek. Za pomoci manuálního ovládání spreje lze jen těžko dosáhnout konstantní teploty uvnitř boxu. Při aplikaci spreje přímo do prostoru kamery není možné zamezit kondenzaci vody ze vzduchu.

2.4. Rozhodovací analýzy prvků chladicího boxu

Nejdůležitější části boxu byly podrobeny rozhodovací analýze (Tab. 1), (Tab. 2), která podává exaktní posouzení jednotlivých vlastností uvažovaných možností. Pro jednotlivé analýzy byla určena různá porovnávací kritéria. Výsledná hodnocení analýz určily nejvhodnější varianty.

Pro hodnocení jednotlivých kritérií byla použita maximální hranice 100 bodů, které dosahuje neideálnější řešení. Dále byly prosté hodnoty podrobeny přepočtu na vážené hodnoty, v souladu s důležitostmi uvedené vlastnosti.

2.4.1. Ovládání kamery

Návrh řešení chladicího boxu musí umožnit plné ovládání kamery. Kameru lze ovládat:

- Přímě
- Bezdrátové dálkové ovládání

V případě ručního ovládání je nutné zajistit přístup do boxu a možnost sledování LCD displeje kamery, tak aby bylo zajištěno správné nastavení snímání obrazu. Ovládání kamery je realizované pomocí tepelně izolačního návleku pevně spojeného s chladicím boxem. Takové řešení umožňuje dokonale chladit kameru a pohodově ovládat její funkce. Uvedená konstrukce boxu klade větší nároky na těsnost spojení boxu a izolačního návleku.

Bezdrátové ovládání umožňuje kameru ovládat z dostatečné vzdálenosti, s využitím všech funkcí kamery, včetně zobrazení pořizovaného snímku na displeji dálkového ovládání. Nepřímé dálkové ovládání lze použít v případě chladicího boxu, který bude po vložení kamer zcela uzavřen. Takové konstrukční řešení vede k zvýšení účinnosti chlazení, způsobené menšími tepelnými ztrátami.

Kritéria rozhodovací analýzy:

1. Ergonomie ovládání
2. Náročnost konstrukčního řešení
3. Hmotnost

Možnosti ovládání:

- A. Přímé ovládání
- B. Dálkové ovládání

Tab. 1 : *Rozhodovací analýza ovládání*

| Kritérium | Váha | A. | | B. | |
|-------------------|------|--------|--------|--------|--------|
| | | Prosté | Vážené | Prosté | Vážené |
| 1. | 3 | 100 | 300 | 50 | 150 |
| 2. | 2 | 70 | 140 | 100 | 200 |
| 3. | 1 | 100 | 100 | 75 | 75 |
| Celkové hodnocení | | 270 | 540 | 225 | 425 |

Přímé ovládání kamery je dle rozhodovací analýzy vhodnějším řešením. Jeho převaha je hlavně v oblasti celkové ergonomie ovládání. Jelikož přímé ovládání kamery je intuitivnější. Verzi s dálkovým ovládáním by museli obsluhovat dvě osoby, jelikož není možné manipulovat s boxem i ovládáním najednou.

2.4.2. Chladicí zařízení**Ranque-Hilschova trubice**

Nejjednodušším principem chlazení je vzduchový systém. V takovém případě neodpadá nezávislost na externím zdroji energie, ale vede k jednoduché konstrukci boxu. Konstrukce boxu se vzduchem chlazeným pomocí Ranque-Hilschovi trubice má nesporné výhody:

- Velikost - malé rozměry umožňují jednoduchou manipulaci.
- Sekundární ohřev vzduchu – chladicí trubici je možné umístit přímo do konstrukce boxu, nedochází tak k ohřívání ochlazeného vzduchu.
- Jednoduchost – trubice nemá žádné pohyblivé součástky a elektrická zařízení, jejichž funkčnost by mohlo ohrožovat teplé a prašné prostředí.
- Regulace – pomocí škrticího ventilu na trubici lze ovládat teplotu výstupního chlazeného vzduchu. Lze tak velmi pohotově a jednoduše regulovat vnitřní teplotu boxu.

Použití Ranque – Hilschovi trubice vyžaduje přívod stlačeného vzduchu o tlaku nejméně 0,7 MPa, tak aby bylo zaručeno dostatečné chlazení. K takovému účelu lze využít centrální rozvody dostupné v provozech. Všechny uvedené vlastnosti vzduchového systému se podílejí na jednoduchosti soustavy, zaručující větší spolehlivost a životnost. Chladicí vzduch proudící přímo kolem těla kamery zaručuje dokonalý přenos tepla. Pro dokonalé proudění vzduchu je nutné zkonstruovat vnitřní plášť boxu a trysku, tak aby došlo k vhodné cirkulaci vzduchu kolem těla kamery. V případě použití trubice nelze opomenout přívod vzduchu, jelikož hadice je složité navíjet a mají navíc značnou hmotnost. Dané faktory značně ovlivňují manipulovatelnost s boxem a jeho celkové ovládání.

Suchý led

Z dostupných chladících medií je vhodným řešením také suchý led. Pro správnou funkci chlazení není potřebný žádný zdroj energie. Energetický zdroj je nahrazen nízkou teplotou ledu a jeho sublimační schopností. Během látkové přeměny dochází k odběru tepla z okolí. Přednostmi uvedeného chladicího principu jsou:

- Vysoký chladicí účinek
- Nízká hmotnost chladiva – hustota suchého ledu je 1500 kg/m^3
- Malé rozměry – nízká prostorová náročnost chladiva

Hlavním negativem chlazení suchým ledem je kondenzace kapek vody na vnitřní ploše boxu. Kondenzace je způsobena nízkou teplotou stěny, pod úrovní teploty rosného bodu vzduchu uvnitř boxu. V případě použití pevného chladiva, by bylo nutné zkonstruovat speciální plášť boxu, který by musel mít kapsy v prostoru mezi vnější a vnitřní stěnou. Zakládání suchého ledu by muselo být jednoduché a rychlé. V případě použití ledu je nutné jeho uschování ve speciálních nádobách i během doby, kdyby nedocházelo ke snímání (doba odpočinku obsluhy kamery). Opakovaná manipulace s ledem prodlužuje celkovou dobu snímání.

Peltierův článek

Peltierův chladicí článek je jeden z nejvhodnějších způsobů chlazení. Jako konstrukční řešení se používá aktivní či pasivní metoda chlazení.

- Aktivní metoda využívá Peltierova článku a přídavného větráku, který podporuje přestup tepla. Takové řešení umožňuje použití menšího počtu článků.
- Pasivní chlazení je tvořeno zpravidla větším počtem Peltierových článků, kde dochází k volnému přestupu tepla mezi článkem a okolním vzduchem. Nedochází u nich ke kolizi maximálních teplot boxu a článku. Proto se jeví jako vhodnější metoda.

Výběr Peltierových článků je závislý na hodnotě maximálního rozdílu teplot teplé a chladné strany a chladicího výkonu. Hodnoty přípustného napětí a proudu jsou podstatné pro výběr vhodného typu baterie či zdroje elektrické energie. Použití elektrických kabelů je mnohem vhodnější než použití hadic vzduchových, jelikož nemají tak velkou hmotnost, navíc mají menší rozměry a je možné je jednoduše navíjet. Takových vlastností je vhodné

využít pro vedení energie ve složitých prostorech sklářských provozů. Nespornou výhodou je také snadná regulace teploty chladicího článku pomocí vstupního napětí. Dalšími přednostmi jsou malá hmotnost a velikost.

Kritéria rozhodovací analýzy:

1. Chladicí účinnost
2. Kondenzace
3. Ergonomie, ovládání a manipulace s boxem
4. Hmotnost
5. Vliv na velikost boxu

Chladicí média:

- A. Ranque-Hilschova trubice
- B. Suchý led
- C. Peltierův článek

Tab. 2 : *Rozhodovací analýza chladicího media*

| Hodnocení | | Prosté | Vážené | Prosté | Vážené | Prosté | Vážené |
|-----------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Kritérium | Váha | A | | B | | C | |
| 1. | 5 | 80 | 400 | 100 | 500 | 90 | 450 |
| 2. | 4 | 100 | 400 | 20 | 80 | 85 | 340 |
| 3. | 3 | 40 | 120 | 95 | 285 | 75 | 225 |
| 4. | 2 | 90 | 180 | 85 | 170 | 70 | 140 |
| 5. | 1 | 95 | 95 | 80 | 80 | 100 | 100 |
| Celkem | | | 1195 | | 1115 | | 1255 |

Peltierův článek byl zvolen, dle rozhodovací analýzy, nejvhodnějším způsobem chlazení. Přednostmi článku jsou vyrovnané vlastnosti ve všech částech rozhodovací analýzy. Článek má vyvážený poměr hmotnosti, velikosti a účinnosti. V dané oblasti převyšuje ostatní metody chlazení. Ranque-Hilschova trubice se jeví jako velmi dobré zařízení, ale dlouhé vedení vzduchových hadic velmi omezuje celkovou manipulovatelnost boxu.

2.4.3. Infračervený průzor

Konstrukce boxu může být otevřená či uzavřená.

- Otevřený box je realizovatelný pomocí volné čelní strany či volného kruhového otvoru před objektivem kamery. V takovém případě je nutné umístit v blízkosti otvoru další chladicí prvky, tak aby zintenzivnily chlazení a zamezily zvýšené prašnosti v boxu. V daném případě je nutné navrhnout účinnější chlazení, než v případě uzavřeného boxu, tak aby byla zaručena stálost vnitřních podmínek boxu.
- Uzavřený box, izolovaný pomocí infračerveného průzoru před objektivem zlepší jak odolnost proti prašnosti, tak i stálost teploty uvnitř boxu. Kamera má dva oddělené objektivy pro snímání infračervených a běžných snímků. Menší z nich je pro snímky běžné, před ním je umístěno okno z křemičitého skla průchozí záření o vlnové délce 0,350 - 750 μm . Větší objektiv je zkonstruován pro snímání infračerveného záření o vlnové délce 7,5 - 13 μm . Objektiv využívá k snímání Germaniovou čočku, která má maximální teplotu použití 90°C. Při zvýšené teplotě dochází u Germania ke krystalizaci, která způsobí destrukci čočky. Výrobce kamery udává maximální pracovní teplotu kamery 50°C, z toho důvodu je nutné zkonstruovat dobře tepelně izolovaný box.

Nároky na průzor infračerveného záření jsou:

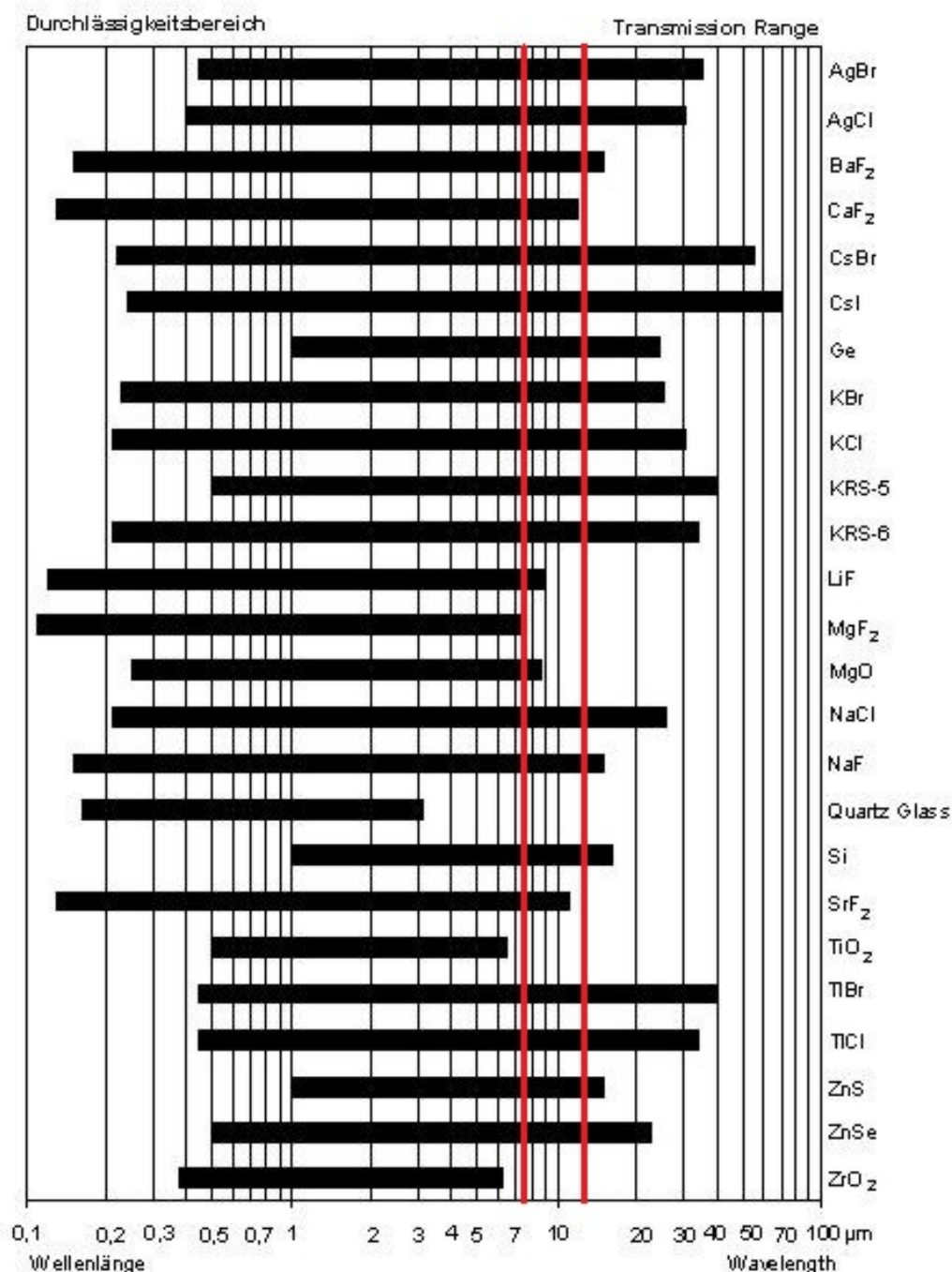
- Teplotní odolnost – hodnocení teploty tání a maximální teploty použití.
- Spektrální rozsah – schopnost propustit záření v celé vlnové délce infračerveného záření (Obr. 7).
- Mikrotvrdost – dostatečná tvrdost povrchu, zaručující odolnost proti poškrábání prachem nebo jinými předměty.
- Pevnost – dostatečná pevnost čočky, aby nedocházelo k samovolné deformaci průzoru.
- Rozpustnost – velmi nízká hodnota rozpustnosti v H_2O , aby nedošlo působením atmosférické vlhkosti k deformaci či změně vlastností průzoru.
- Tepelná vodivost – vhodná hodnota tak, aby nedocházelo k přílišnému vedení tepla s okolím.
- Reflexní ztráty – nízké hodnoty ztrát, které ovlivní výsledné hodnoty změřených teplot.
- Toxicita – chemické vlastnosti materiálu, nevyžadující zvláštní bezpečnostní zacházení s průzorem.

Na základě spektrálních rozsahů byl vybrán soubor vhodných materiálů. Dalším posouzením jednotlivých vlastností z uvedených grafů (Obr.8), (Obr. 9), (Obr. 10), (Obr.11) a tabulky (Tab.3) byly vybrány jako nejvhodnější materiály ZnS – Sulfid Zinku, ZnSe – Selenid Zinku. Oba materiály mají značné pohlcující účinky na záření, proto je nutné zkalibrovat kameru pro měření skrz infračervený průzor.

- Sulfid Zinku – je vyráběn syntézou prášku zinku a plynu H_2S . Velikost v mikrokrytalické struktuře ovlivňuje konečnou pevnost materiálu. Skladování neklade žádné požadavky na

ochranu. ZnS oxiduje na teplotě 300°C a vykazuje plastickou deformaci při teplotách okolo 500°C. Maximální teplota použití je stanovena výrobcem na 250°C.

- Selenid zinku - je vyráběn syntézou prášku zinku a plynu H_2S . ZnS oxiduje na teplotě 300°C a vykazuje plastickou deformaci při teplotách okolo 500°C. Maximální teplota použití je stanovena výrobcem na 250°C.

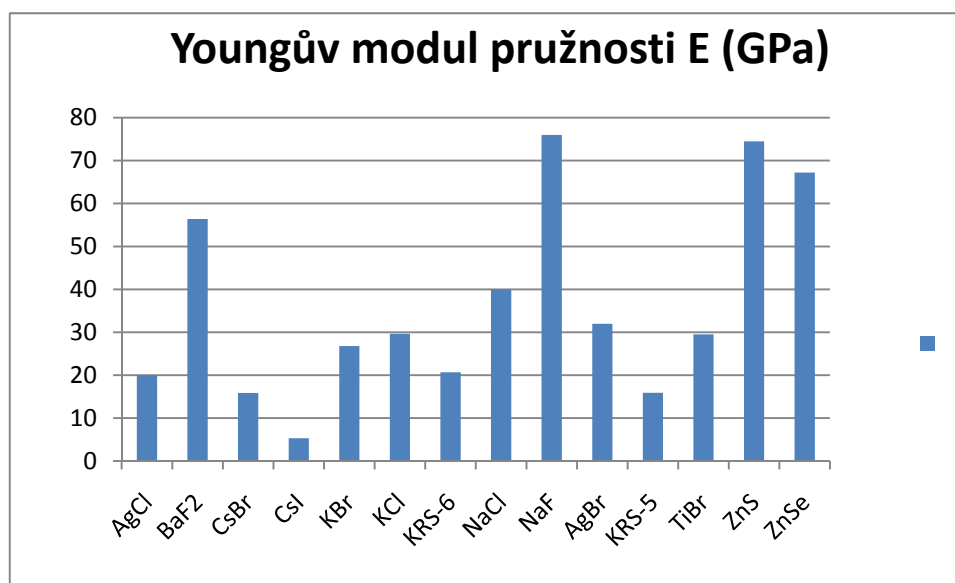


Obr.7: Porovnání spektrálních rozsahů, vyznačený infračervený rozsah kamery [22]

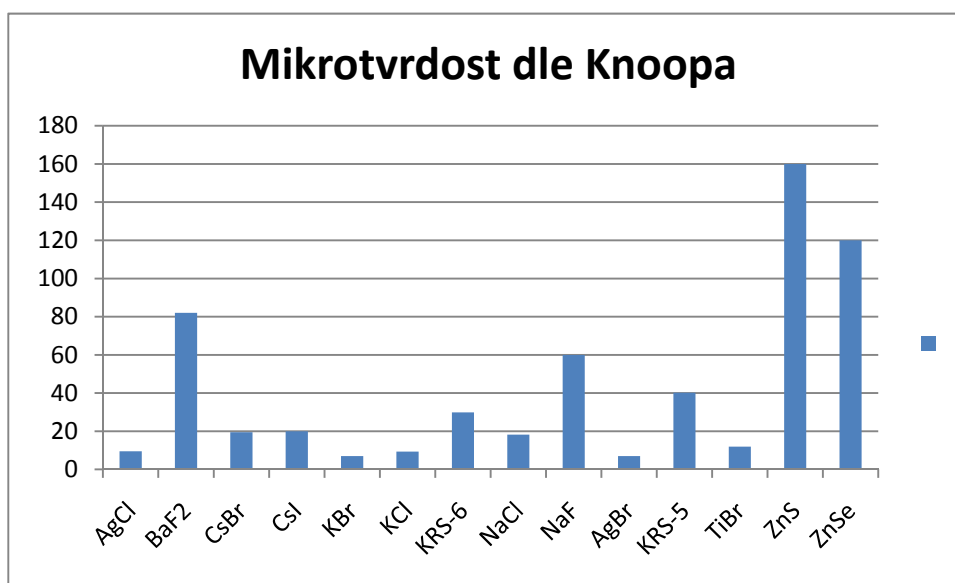
Tab. 3 : Vlastnosti vybraných materiálů [21]

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------|----------|----------------|-------|-------|-------|------|----------|-------------|
| AgCl | 0,4-30 | 1,9803(10μm) | 19,5 | 457 | 19,98 | 9,5 | 0,00052 | 1,15 |
| BaF2 | 0,15-15 | 1,462(2,6μm) | 7,7 | 1386 | 56,4 | 82 | 0,17 | 11,27(13°C) |
| CsBr | 0,25-40 | 1,6612(11μm) | 11,6) | 636 | 15,85 | 19,5 | 124,3 | 0,94(0°C) |
| CsI | 0,25-55 | 1,78 (10μm) | 13,6 | 621 | 5,3 | 20 | 44 | 1,1(0°C) |
| KBr | 0,23-25 | 1,53(10μm) | 8,3 | 730 | 26,8 | 7 | 53,48 | 4,816(20°C) |
| KCl | 0,21-20 | 1,45(10μm) | 6,7 | 776 | 29,67 | 9,3 | 34,7 | 6,53(39°C) |
| KRS-6 | 0,4-25 | 2,1723(11μm) | 24 | 423 | 20,68 | 29,9 | 0,3 | 0,7(56°C) |
| NaCl | 0,2-15 | 1,5(10μm) | 7,5 | 801 | 39,98 | 18,2 | 35,7 | 1,15(0°C) |
| NaF | 0,14-13 | 1,233(10,3μ) | 3,6 | 993 | 76 | 60 | 4,22 | 3,746(0°C) |
| AgBr | 0,45-35 | 2,167(10μm) | 23,9 | 432 | 31,97 | 7 | 0,000012 | 1,21(0°C) |
| KRS-5 | 0,6-40 | 2,371(10μm) | 28,4 | 414,5 | 15,89 | 40,2 | 0,05 | 0,544(20°C) |
| TiBr | 0,5 - 40 | 2,338(10μm) | 27,7 | 460,5 | 29,5 | 11,9 | 0,05 | 0,586(70°C) |
| ZnS | 1.14 | 2,192(10,6μm) | 24,6 | 1827 | 74,5 | 160 | 0,000065 | 16,7(23°C) |
| ZnSe | 0,6 - 21 | 2,4028(10,6μm) | 29,1 | 1525 | 67,2 | 120) | 0,001 | 18(25°C) |

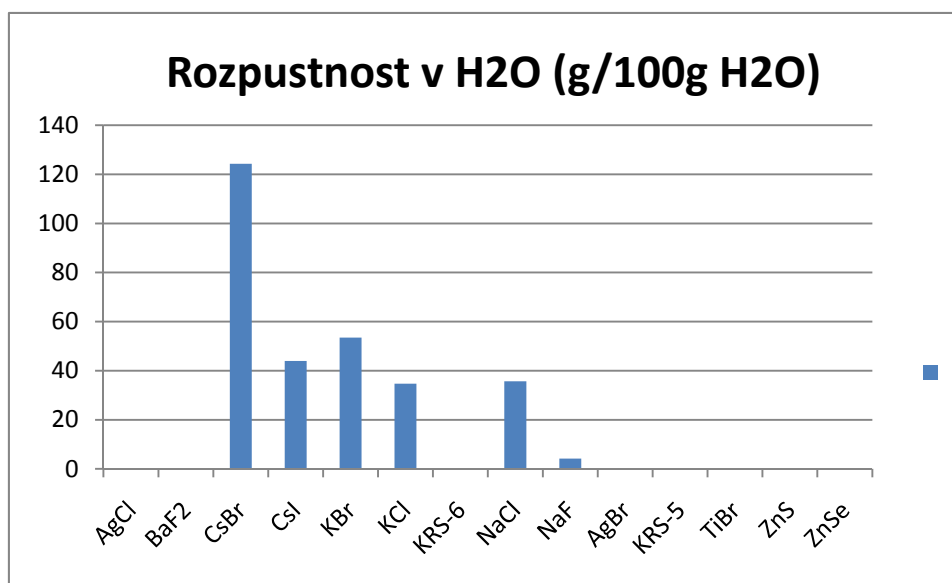
Pozn.: 1 – spektrální rozsah (μm), 2 – index lomu, 3 – reflexní ztráty (%), 4 – teplota tání (°C), 5 – Youngův modul pružnosti (GPa), 6 – Tvrdost dle Knoop , 7- rozpustnost v H₂O (g / 100g H₂O), 8 – Tepelná vodivost (W.m⁻¹.K⁻¹)



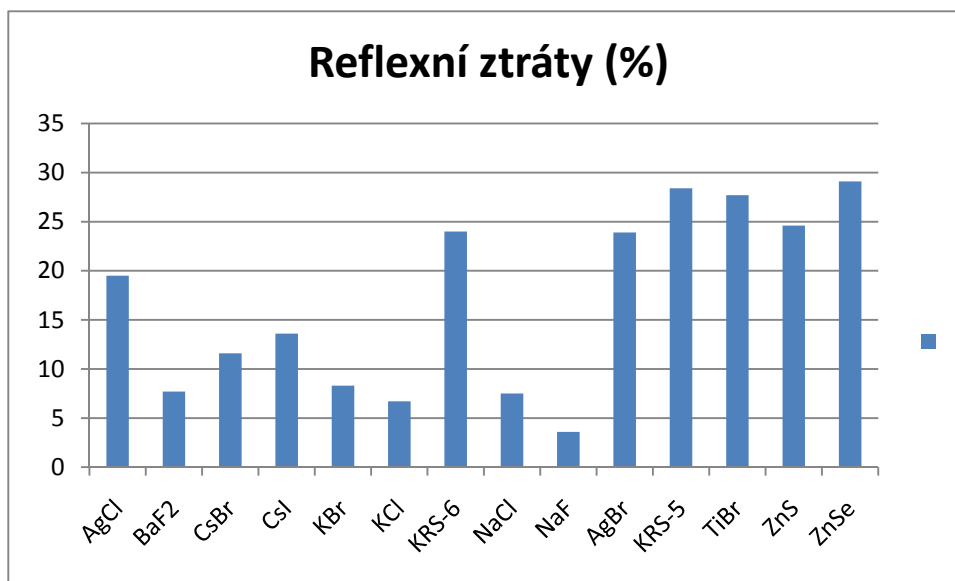
Obr. 8: Srovnání modulů pružnosti



Obr. 9: Srovnání mikrotvrdosti



Obr. 10: Srovnání rozpustnosti v H₂O



Obr. 11: Srovnání reflexních ztrát

Rozměry infračerveného okna závisí na zorném poli kamery. To má obdélníkový tvar s horizontální hranou (A), vertikální hranou (B). Velikost zorného pole je odvozen od vzdálenosti od hrany objektivu (D) (Tab. 4). Kameru lze používat s různými typy objektivu s ohniskovou vzdáleností: 19 mm, 37,64 mm, 76 mm. Jelikož objektiv s kratší ohniskovou vzdáleností (19 mm) má větší zobrazovací úhel, má při stejné vzdálenosti od objektivu největší zorné pole. Z toho důvodu lze uvažovat velikost zorného pole pouze 19 mm objektivu.

Tab. 4 : Rozměry zorného pole

| | | |
|---------------------------------------|-----|----|
| Ohniskové vzdálenost objektivu: 19 mm | | |
| Zobrazovací úhel: 45° | | |
| D (mm) | 500 | 50 |
| A (mm) | 410 | 41 |
| B (mm) | 310 | 31 |

Jelikož je v nabídce kruhový tvar průzoru, je nutné dopočítat minimální průměr okna (R_{ZnSe})

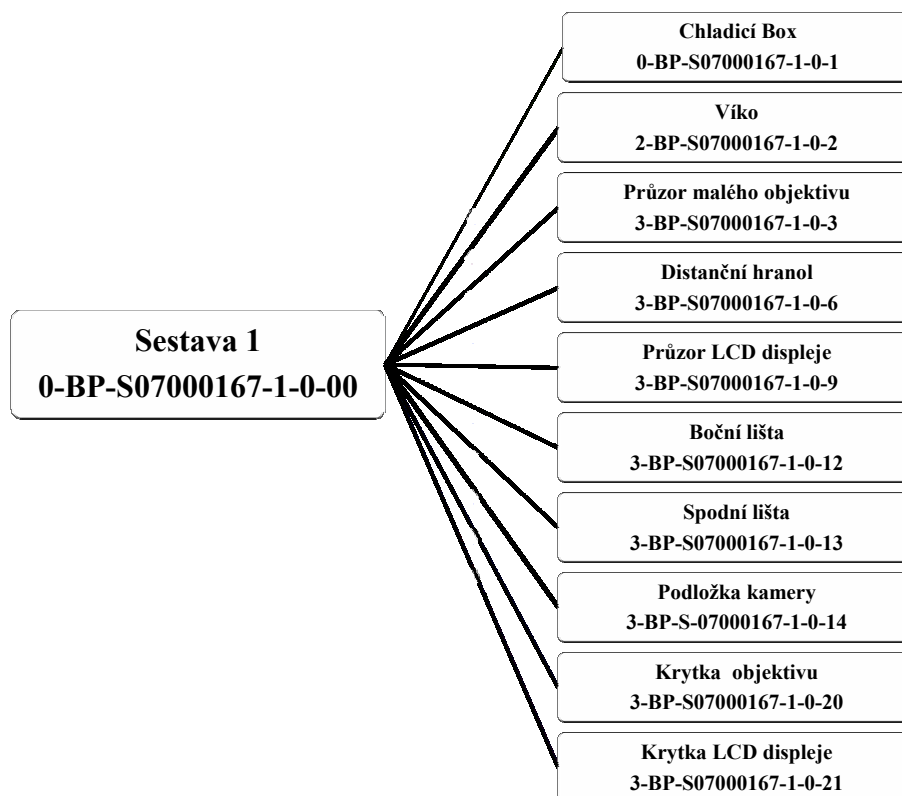
$$R = \sqrt{(A^2 + B^2)} = \sqrt{(41^2 + 31^2)} = 51,4 \text{ mm}$$

V požadovaném rozměru jsou dostupné průzory pouze z materiálu ZnSe, tudíž volíme tento materiál. K dostání jsou okna s $R = 60 \text{ mm}$ a $R = 76,2 \text{ mm}$. Konstrukčními prvky potřebnými k uchycení průzoru dojde k zmenšení zorného pole, proto volíme za vhodnější větší průměr průzoru.

Infračervený průzor: materiál Znse, rozměry $R = 76,2 \text{ mm}$, tloušťka 3 mm. [23]

3. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ CHLADICÍHO BOXU

Konstrukční řešení uvádí přehled celé sestavy boxu a kamery (Obr. 13). Jednotlivé kapitoly podrobněji analyzují prvky sestavy s důrazem na Peltierův článek. Dalšími popsány součástmi jsou chladiče a větráky. Navazující kapitoly rozebírají použitý materiál opláštění boxu, výběr izolace otvoru pro ruku či zdroj elektrické energie Peltierových článků. Poslední kapitola uvádí technickou přípravu boxu před měřením. Neméně důležitou součástí konstrukčního řešení je výkresová dokumentace přiložená k bakalářské práci (Obr. 12).

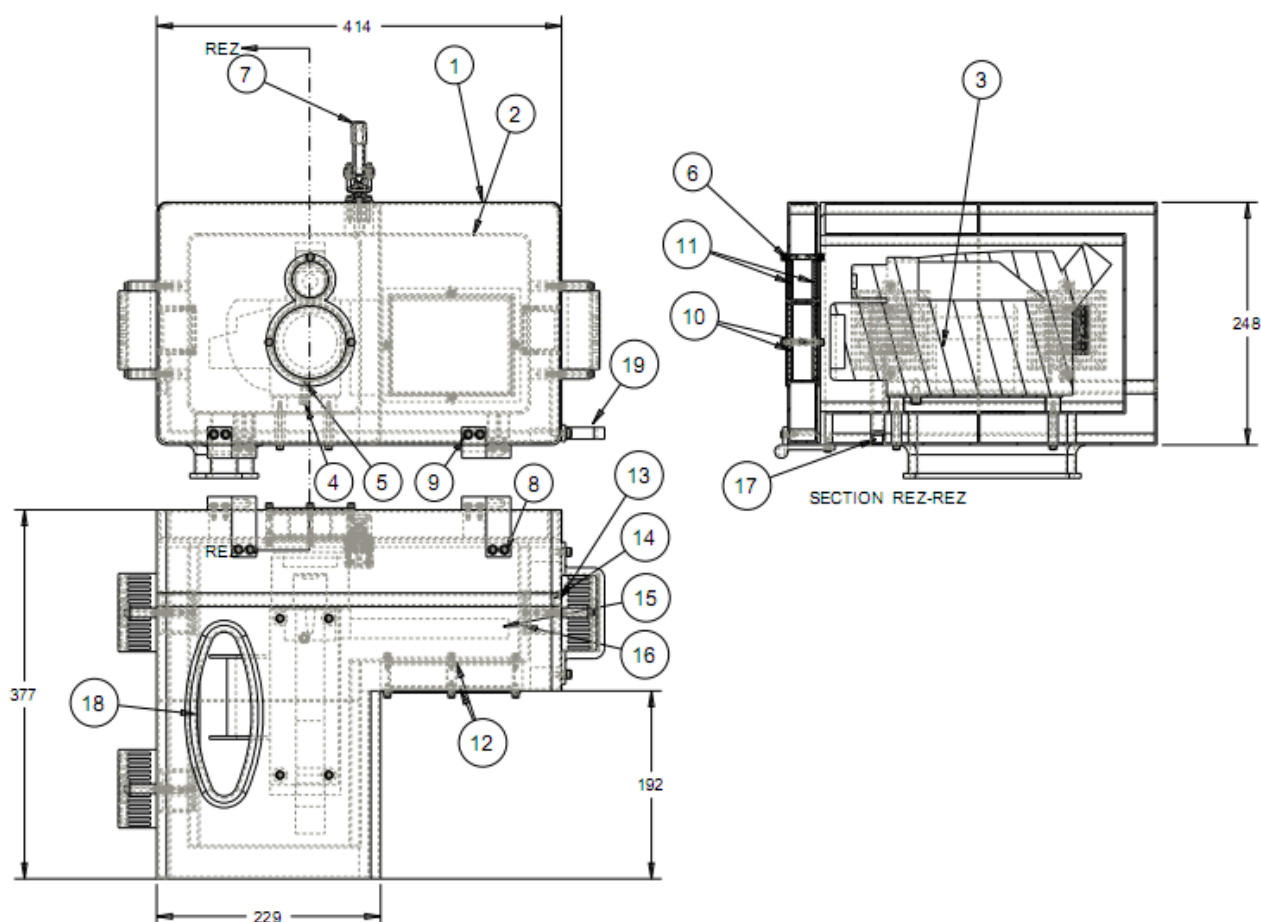


Obr. 12: Schéma výkresové dokumentace

Kamera je umístěna uvnitř boxu, prostor mezi vnější 1 a vnitřní 2 vrstvou pláště je vyplněn vzduchem. Ten je velmi dobrým tepelným izolantem ($\Lambda_{\text{vzduch}} = 0,02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), a vhodně nahrazuje jiné izolační materiály. Upevnění kamery 3 zajišťuje stativový šroub 4, spojený se sériovým stativovým závitem kamery. Kamera je v boxu fixována na podložce 5, která napomáhá lepší stabilitě v předepsané pozici. Na přední straně boxu je demontovatelný kryt 6 aretovaný v předepsané poloze třmenovým rychloupínačem 7. Kryt lze jednoduše sejmout po uvolnění rychloupínače a vysazení z dvojice pantu na spodní straně krytu 8 a víka 9. V místě zorného pole infračerveného objektivu je umístěna dvojice infračervených průzorů 10 z materiálu ZnSe. Před objektivem pro běžné snímky jsou v krytu dvě okna z teplotně odolného borokřemičitého skla Simax 11. Další část boxu vyplněné sklem Simax 12 se nachází v místě LCD displeje, aby bylo možné sledovat snímání záběrů a upravovat jejich parametry (přiblížení, ostření atd.). Všechny průzory boxu jsou připevněny pomocí pevných tvarových prvků a speciálně vyrobených krytek z teflonu. Chladicími medii jsou Peltierovy

články 13 umístěné na svislých stěnách boxu. Na teplé straně Peltierova článku je umístěn chladič s větrákem 14. Studená strana článku je propojena s vnitřním chladičem 15 pomocí hliníkové distanční vložky (č.16) (hranolek). Hranolek zvětšuje tloušťku modulu a zvětšuje vzdálenost mezi chladiči, čímž zlepšuje tepelnou izolaci. Hranolek není umístěn na teplé straně, jelikož zde protéká větší množství tepla a snižoval by tak dosažitelný rozdíl teplot článku. Chladicí systém je umístěn na svislých stranách boxu, jelikož tato pozice zlepšuje přestup tepla z chladiče. Peltierovy články a větráky na chladičích jsou napájeny skrz dráty, které vedou drážkou 17 umístěnou na plášti boxu. Drážka bude po instalaci drátů vyplněná lehkým izolačním materiálem a překryta krytkou, přilepenou k plášti. Připojení zdroje energie bude realizováno pomocí vícekolíkového konektoru. Kamera je ovládána pravou rukou, vložena do boxu otvorem ve dně 18. Otvor je speciálně tvarovaný pro přichycení izolačního návleku. Madlo 19 umístěné na vnějším plášti, usnadňuje manipulaci s boxem pomocí levé ruky. Dále napomáhá rozložení hmotnosti boxu na obě ruce.

Snímání teplot probíhá v krátkých časových intervalech. Délka jednotlivých snímání je ovlivněna vysokou teplotou, na kterou špatně reaguje lidské tělo a neumožňuje delší setrvání v blízkosti tavicího agregátu. V případě těchto periodických změn je nutné uvažovat změnu chladicího režimu v době snímání – plný výkon a době zotavení – snížený výkon.



Obr. 13: Sestava chladicího boxu a kamery

3.1. Výpočet tepelné ztráty a potřebného chladicího výkonu

Počet Peltierových článků je odvozen od potřebného množství chladicího výkonu. Chladicí výkon musí být nejméně roven tepelné ztrátě boxu. Pro výpočet tepelné ztráty uvádím tloušťku vzduchové mezery pláště 30mm, tloušťku stěn 2mm a vnější rozměry boxu zřejmě z Obr.12. Výsledkem níže uvedených výpočtů je požadovaný chladicí výkon.

$$\text{Tepelná ztráta: } Q = \frac{S \cdot \Delta T}{\frac{d}{\lambda}} [\text{W}]$$

S... plocha stěny [m²]

ΔT ... rozdíl teplot stěn [K]

d...tloušťka stěny [m]

λ ...tepelná vodivost [W. m⁻¹ . K⁻¹]

Tepelná ztráta - Infračervený průzor

$$\Lambda_{\text{ZnSe}} = 18 \text{ W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \Lambda_{\text{vzduch}} = 0,02 \text{ W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, R = 0,0381 \text{ m}, d_1 = 0,003 \text{ m}, \\ d_2 = 0,024 \text{ m}, \Delta T = 50 \text{ K}$$

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,0381^2 = 0,00456 \text{ m}^2$$

$$Q = \frac{S \cdot \Delta T}{\frac{d_1}{\lambda_{\text{ZnSe}}} + \frac{d_2}{\lambda_{\text{vz}}} + \frac{d_1}{\lambda_{\text{ZnSe}}}} = \frac{0,00456 \cdot 50}{\frac{0,003}{18} + \frac{0,024}{0,02} + \frac{0,003}{18}} = 0,190 \text{ W}$$

Tepelná ztráta – Průzor LCD displeje a malého objektivu

$$\Lambda_{\text{Simax}} = 1,2 \text{ W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \Lambda_{\text{vzduch}} = 0,02 \text{ W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad d_1 = 0,003 \text{ m}, d_2 = 0,024 \text{ m}, \\ \Delta T = 50 \text{ K}, r = 0,02 \text{ m}, a = 0,17 \text{ m}, b = 0,1 \text{ m}$$

$$S_{21} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,02^2 = 0,00126 \text{ m}^2$$

$$S_{22} = a \cdot b = 0,17 \cdot 0,1 = 0,017 \text{ m}^2$$

$$S_2 = S_{21} + S_{22} = 0,01826 \text{ m}^2$$

$$Q = \frac{S \cdot \Delta T}{\frac{d_1}{\lambda_{\text{Simax}}} + \frac{d_2}{\lambda_{\text{vz}}} + \frac{d_1}{\lambda_{\text{Simax}}}} = \frac{0,01826 \cdot 50}{\frac{0,003}{1,2} + \frac{0,026}{0,02} + \frac{0,003}{1,2}} = 0,76 \text{ W}$$

Tepelná ztráta - Plášť boxu

$$\Lambda_{\text{vzduch}} = 0,02 \text{ W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \Lambda_{\text{PC}} = 0,2 \text{ W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad d_{\text{ocel}} = 0,002 \text{ m}, d_{\text{VZ.}} = 0,03 \text{ m} \\ \Delta T = 50^\circ \text{C}, a = 0,377 \text{ m}, b = 0,414 \text{ m}, d = 0,192 \text{ m}, e = 0,185 \text{ m}, v = 0,248 \text{ m}$$

$$S_3 = 2 \cdot (a \cdot b - (d \cdot e)) + 2 \cdot (a \cdot v) + 2 \cdot (v \cdot b) - S_1 - S_2$$

$$S_3 = 2 \cdot (0,377 \cdot 0,414 - (0,185 \cdot 0,192)) + 2 \cdot (0,248 \cdot 0,377) + 2 \cdot (0,377 \cdot 0,414) - 0,00456 - 0,01826 = 0,5695 \text{ m}^2$$

$$Q_3 = \frac{S \cdot \Delta T}{\frac{d_{PC}}{\lambda_{PC}} + \frac{d_{vz}}{\lambda_{vz}} + \frac{d_{PC}}{\lambda_{PC}}} = \frac{0,5695 \cdot 50}{\frac{0,002}{0,2} + \frac{0,03}{0,02} + \frac{0,002}{0,2}} = 18,73 \text{ W}$$

Příkon kamery

$$U = 7,2 \text{ V}, I = 1,47 \text{ A}$$

$$P = U \cdot I = 1,47 \cdot 7,2 = 10,584 \text{ W}$$

Celková tepelná ztráta

$$Q_{\text{celk.}} = Q_{11} + Q_{22} + Q_3 + P = 30,23 \text{ W}$$

3.2. Peltierův článek

Požadované parametry

- Chladicí výkon – absorbované množství tepla studenou stranou
- Teplota studené strany T_c
- Teplota teplé strany T_h

Teplota studené strany je shodná s požadovanou teplotou uvnitř boxu. Maximální hodnota T_c je 50°C , je určena maximální teplotou použití kamery, nastane v případě okolní teploty 100°C . Běžná teplota ve sklářském provozu je 70°C , takovým podmínkám odpovídá T_c 30°C . Jelikož bude docházet k neperiodickým změnám teplot, nelze uvažovat hodnoty průměrné, ale maximální. Maximální podmínky nastanou v krátkých časových intervalech, v případě přiblížení kamery k tavícímu agregátu.

- $T_c = 50^\circ\text{C}$

Teplota teplé strany se odvozuje od okolní teploty. V kombinaci Peltierova modulu s chladičem ofukovaným větrákem se stanovuje na hodnotě o 5 až 10°C vyšší než je teplota okolí.

- $T_h = 110^\circ\text{C}$

Peltierův článek AI - 011

Výrobci přikládají k článkům jejich výkonové charakteristiky, které představují závislost chladicího výkonu Q (W) na rozdílu teplot ($^\circ\text{C}$) a vstupním proudem I (A) či napětím U (V). Určujícími parametry vhodného článku jsou: $Q = 30 \text{ W}$, $\Delta T = 60^\circ\text{C}$.

Udaným parametrům odpovídají modely se zvýšenou teplotní odolností, umožňující použití v teplotách vyšších než 100°C. Takové modely nabízejí při požadovaném výkon, dostatečnou teplotní diferencí ΔT . Vybraným modelem je:

- Altec Al – 011 – model se zvýšenou chladicí schopností, hermetizovaný proti vlhkosti, s maximální provozní teplotou 150°C a zvýšenou životností. Model s nejvyšší teplotní diferencí ΔT na trhu.

Tab. 5 : *Technické údaje Al - 011*

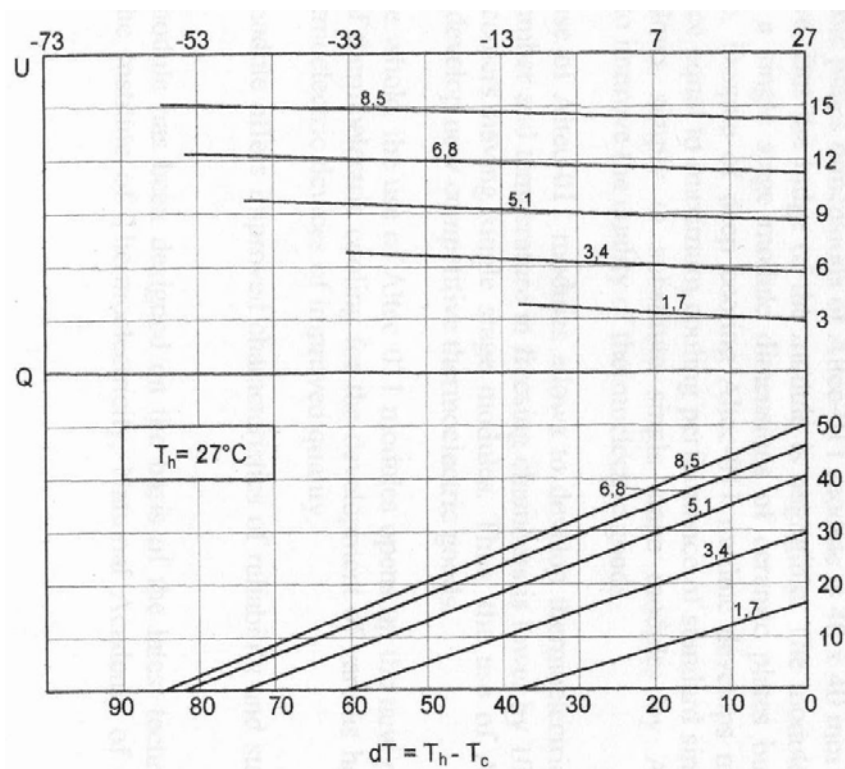
| I_{\max}/A | P_{\max}/W | U_{\max}/V | $\Delta T = T_h - T_c / ^\circ C$ | Rozměry/mm |
|--------------|--------------|--------------|-----------------------------------|---------------|
| 8,5 | 50 | 15 | 85 | 40 x 40 x 6,7 |

Charakteristika Peltierova modulu udává jeho základní chladicí parametry. Na základě analýzy charakteristik (Obr. 8, Obr. 9) vybraného modelu byly určeny hodnoty maximálního rozdílu teplot $\Delta T = 60^\circ C$ odpovídající chladicímu výkonu jednoho článku $Q_1 = 20 \text{ W}$. Pro zaručení správné funkce byl požadovaný výkon navýšen na dvojnásobek teoretické hodnoty. Eliminuje tím možné nedostatky izolace otvorů v boxu. Počet článku znásobuje celkový výkon, při použití tří článku disponuje box chladicím výkonem $Q_{\text{celk.}} = 60 \text{ W}$. Nastavení požadovaných hodnot je prováděno pomocí vstupního napětí ze zdroje. Při instalaci chladicích komponent boxu je nutné dbát na pevné spojení Peltierových článků, hranolu a chladičů pomocí teplovodivé pasty, abychom zaručili dokonalý přenos tepla mezi jednotlivými částmi. [24]

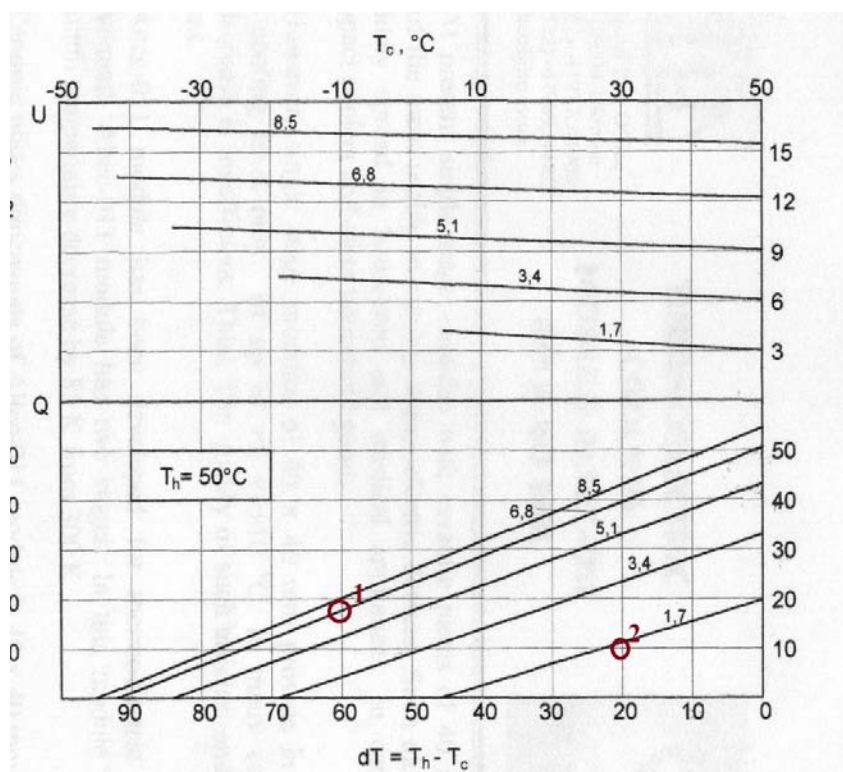
Chladicí režimy Peltierova článku

- Plný výkon 1 je specifikován maximální hodnotou přeneseného tepla související s maximální hodnotou ΔT . Na základě charakteristik modulu Altec – 011 jsme stanovili funkční hodnoty článku. Požadovaného teplotního rozdílu dosáhneme napájením 12V, při kterých odebere článek proud $I = 6,8 \text{ A}$.
- Snížený režim 2 je charakterizován nižším chladicím výkonem, a odlišnou teplotou na obou stranách článku. Teplota okolí je v tomto případě 30-50°C. Potřebný chladicí výkon je $Q_{\text{celk.}} = 30 \text{ W}$, což určuje výkon jednoho článku $Q_1 = 10 \text{ W}$. Teplota nesmí poklesnout na nízkou teplotu, jinak může dojít k podchlazení prostoru kamery a nežádoucí kondenzaci na povrchu chladiče. Snížením napájecího napětí dojde k omezení funkce větráku, která ale při nižší teplotě T_h významně neovlivní chladicí účinnost. Charakteristické hodnoty zdroje pro snížený režim jsou napětí 3 V, při kterém článek odebere proud $I = 1,7 \text{ A}$.

Nastavení požadovaných hodnot je provedeno přímo na elektrickém zdroji. Zvolený model umožňuje jednoduše kontrolovat požadované hodnoty na LCD displeji.



Obr. 14: Charakteristika modulu Al - 011 při 27°C , [23]



Obr. 15: Charakteristika modulu Al - 011 při 50°C , [24]

3.3. Chladiče a větráky

Nedílnou součástí chladicí soustavy jsou chladiče. Jednotlivé chladiče jsou umístěny na teplé i studené straně článku. Větší důležitost se přidává tomu na teplé straně, který se ohřívá od vyzářené energie článku, kterou dále odvádí do okolního prostředí. Chladič studené strany absorbuje teplo z okolí a odvádí ho z chlazeného prostoru. V případě rostoucí teploty T_t dochází ke zvýšení teploty T_s a k snížení účinnosti chlazení. Kritérii pro výběr chladiče jsou

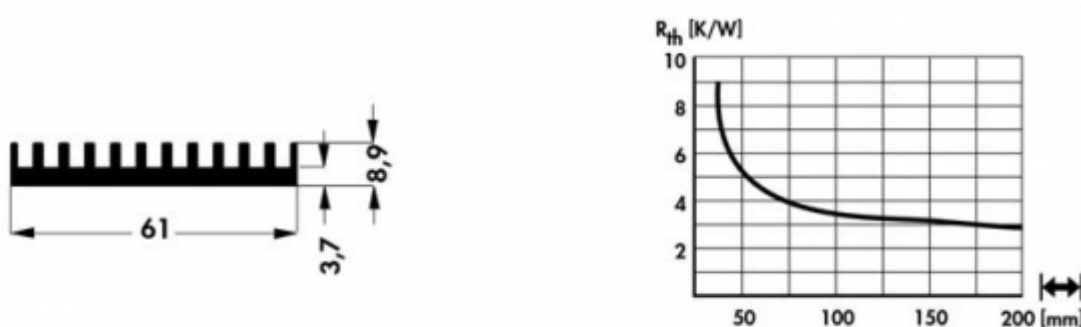
- Teplosměnná plocha
- Tepelný odpor chladiče R_{th} [K/W]

Větrák umístěný na žebrované straně chladiče zvyšuje míru přestupu tepla do okolí. Jeho teplotní odolnost byla podrobena zatěžovacímu testu na Katedře skla a robotiky. Větrák byl umístěn v elektrické peci po dobu 10 minut při 110°C . Větrák byl po celou dobu testu funkční. Na konci testu vykazoval malé známky teplotní deformace, které zmizely při ochlazení. Test byl proveden při maximálních požadovaných podmínkách, z uvedených informací je možno uvažovat dostupný větrák za vyhovující.

Vnitřní chladič

Vnitřní plášť boxu je opatřen pouze samostatným chladičem. Jeho výběr je omezen vnitřním prostorem, jelikož vysoký chladič s velkou teplosměnnou plochou by zvětšoval rozměry boxu. Z tohoto důvodu jsme omezili výšku chladiče na 10mm. Výběr vhodného typu je zvolen s ohledem na jeho tepelný odpor. Tento chladič bude připevněn k svislé ploše pomocí dvojice šroubů.

- Chladič Fisher SK 48575 – Při délce chladiče 75mm dosáhneme tepelného odporu $R_{th} = 4$ K/W (Obr. 10). Materiál chladiče je hliníková slitina, které je zde upřednostněna před mědí, která má lepší vodivé vlastnosti a snižuje tím tepelný odpor R_{th} chladiče. Poměr mezi měrnou hmotností obou materiálů ovšem nepřipouští použití měděného chladiče.



Obr. 16 : Rozměrová specifikace a graf R_{th} SK 48575, [25]

Vnější chladič

Vnější část boxu musí být opatřena jak chladičem, tak i větrákem, který zvětší odvod tepla z povrchu chladiče. Vhodným řešením je set chladiče i větráku od jednoho výrobce

používaný po chlazení CPU jádra ve výpočetní technice. Při výběru jsme brali ohled na připevnění setu na plášť boxu, hmotnost a účinnost. Všechny uvedené vlastnosti musí být v rovnováze, tak aby byly dodrženy nejdůležitější zásady konstrukce boxu. Nejvhodnějším zařízením dle uvedených kritérií je:

- Akasa AK –CC1101SP02 - zvolený typ chladiče je stejně jako vnitřní z hliníkové slitiny. Větrák je pevně spojen s chladičem. Celý set je připevněn k plášti dvojicí šroubů M4x45. Kompaktní tvar chladiče a větráku byl zvolen s ohledem na minimalizaci rozměrů celého boxu.

Tab. 6 : *Technické údaje chladiče AK CC1101SP02I*, [26]

| Materiál | Rozměry/ mm | $R_{th} / K \cdot W^{-1}$ |
|----------|--------------|---------------------------|
| hliník | 80 x 80 x 29 | 0,4 |

Tab. 7 : *Technické údaje větráku AK CC1101SP02*, [26]

| Životnost / hod | Rozměry | Otáčky ot./min | Napětí U/V | El. Proud I/A | Hmotnost / g |
|-----------------|--------------|----------------|------------|---------------|--------------|
| 70000 | 80 x 80 x 10 | 600-3000 | 12V | 0,25 | 182 |

3.4. Materiál konstrukce

Výběrem vhodného materiálu opláštění je možné velice ovlivnit výslednou hmotnost boxu. Nelze však zanedbat mechanické vlastnosti určující pevnost a křehkost konstrukce. Dalším parametrem je také technologie výroby či spojení jednotlivých částí boxu.

Výhodné mechanické vlastnosti mají plechy ocelové či ze slitin lehkých kovů. Bohužel takové materiály dosahují nevhodné hmotnosti opláštění. Hmotnost samotného boxu se pohybuje okolo 20 kg v případě použití oceli a 10 kg při použití hliníkové slitiny. Vhodnějším řešením jsou plastové materiály.

Jedna z možností je použití sériově vyráběných desek z materiálu Murylon HT. Použitý materiál je plast na bázi Polyamidu (PA). Dlouhodobá teplotní odolnost se pohybuje na hranici 135°C a jednotlivé desky lze běžně spojovat lepením. Pro tento způsob výroby by musel mít box speciální tvarové prvky, které by napomáhaly spojení jednotlivých desek. Takové faktory negativně ovlivňují konstrukční řešení boxu.

Vybraná metody výroby boxu je Rapid Prototyping FMD. Tato technologie se převážně využívá k stavbě modelů z plastů ABS nebo Polykarbonát (PC) (Tab. 8). Polykarbonát má lepší mechanické vlastnosti i vyšší teplotu použití. Dutina mezi vnitřním a vnějším pláštěm boxu bude vyplněná podpurnou mřížkou. Ta je vytvářena automaticky při aplikaci Rapid Prototypingu. A není tak přímo navržena ve výkresové dokumentaci. Uvnitř stěn bude tvořit vnitřní podporu na místo konstrukčních výztuží a žeber.

Rapid Prototyping FMD se vyznačuje tvorbou velmi rozmanitých tvarů a sestav, přímo z dodaných 3D modelů. Technologie je založena na tavení vlákna konstrukčního materiálu v pohyblivé hlavě. V té je umístěna tryska, která z nataveného materiálu vytváří reálný model po jednotlivých vrstvách. V případě potřeby je současně nanášen podpůrný materiál. Podpory lze v případě potřeby mechanicky oddělit. [27]

Tab. 8 : *Mechanické vlastnosti PC*, [28]

| Pevnost v tahu / MPa | Teplotní odolnost / °C | Bod měknutí / °C | Hustota kg . m ⁻³ / | Souč. tepel. vodivost / W.m ⁻¹ .K ⁻¹ |
|-------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------------|--|
| 68 | 138 | 139 | 1200 | 0,2 |

3.5. Zdroj elektrické energie

Aktivní prvky chlazení, Peltierovy moduly a větráky, musejí být napájeny ze zdroje elektrické energie. Pro výběr napájecího zdroje jsou stanoveny požadované hodnoty:

- Napětí – proměnlivé 5 – 15 V
- Proud – minimální 30 A
- Výkon – minimální 160 W

Volbu jednotlivých chladicích režimů zaručíme výběrem zdroje elektrické energie připojeným do elektrické sítě, kterým lze regulovat hodnotu výstupního napětí a proudu.

Nastavením hodnot napětí U (V) jednotlivých režimů, uvedených v předchozím rozboru, ovládáme hodnoty T_c (°C), T_h (°C), P (W). Zdroj s požadovanou hodnotou elektrického proudu a napětí je typ:

- Fusion Power Supply 600 W (Tab. 10). – zdroj s postačujícími technickými parametry, odpovídající hodnotám nastavitelných režimů, dále nabízí dostatečnou velikost elektrického proudu, pro napájení Peltierových článků i větráků.

Tab. 9: *Technické údaje Fusion Power Supply 600W*, [29]

| Vstupní napětí / V | Výkon / W | Výstup. napětí / V | Výstup. Proud / A |
|-----------------------|-----------|-----------------------|----------------------|
| 220 - 240 | 600 | 5 - 15 | 0 - 40 |

Připojení elektrického vedení boxu a prodlužovacího kabelu bude provedeno pomocí dvojice 6-kolíkových konektorů. Jejich vzájemné spojení je provedeno pomocí závitů. Délka prodlužovacího kabelu je 50m, abychom zaručili dostatečnou vzdálenost zdroje od exponovaných míst měření.

3.6. Izolační návlek

Pro ovládání kamery byl vybrán tepelně izolační návlek, který bude připevněn k plášti boxu pomocí kovového stahovacího pásu a speciálně tvarovaného otvoru v plášti boxu. Materiál návleku je Kevlar. K zesílení izolačního účinku je možné obalit návlek speciálním izolační hmotou, používanou k obalení Alu trubek.

3.7. Technická příprava boxu

Kamera se umístí do předepsaného místa pomocí stativového šroubu, zde je nutné bezpečně dotáhnout podložku kamery k boxu, aby nedošlo k jejímu uvolnění během snímání obrazu. Mezi plochami boxu a předního krytu je umístěna izolace, která omezuje únik tepla v těchto místech. Vrstva izolace a její přesné dosednutí na obě plochy je nutné pravidelně kontrolovat. Dále dojde k upevnění předního krytu pomocí dvojice pantů, jeho aretace v uzavřené poloze se provede pomocí třmenového upínače. Poslední přípravnou fází je připojení boxu ke zdroji a nastavení hodnot napětí potřebných ke správné funkci chlazení. V takovém případě je již box připraven, proto lze zařezat ruku v boxu. Izolace otvoru pro ruku je nutné pečlivě dotáhnout kolem ruky pomocí fixačních pásků, aby nedocházelo k přílišnému úniku tepla. Alternativním řešením je vložení izolace do rukávu ochranného obleku. Dále je již možné začít snímat teplotní pole. Napájecí kabel je odvíjen z cívky a je nutné brát zřetel na jeho vedení, aby nedošlo k jeho poškození.

4. ZHODNOCENÍ PŘÍNOSU

Dle zadání byl vytvořen návrh chladicího boxu, umožňující použití kamery Flir SC 660 v prostředí s intenzivní prašností a zvýšenou teplotou.

4.1. Technické hodnocení

Navržená konstrukce boxu chrání kameru před vlivem vysoké teploty a prašného prostředí v extrémních podmínkách v blízkosti diagnostikovaných celků. Před zrnky prachu je kamera chráněna pomocí uzavřené konstrukce boxu. Ochrana před vysokou teplota je zajištěna pomocí několika elementů. Izolace boxu chrání kameru před přílišným vedením tepla pláštěm boxu do vnitřního prostoru. Dutina boxu není vyplněná žádným speciálním materiálem, ale vzduchem, který má dostatečné izolační vlastnosti a nezvyšuje hmotnost boxu. Peltierovy články naopak teplo z prostoru odvádí, čímž snižují teplotu uvnitř boxu. Navržené tři články bezpečně kompenzují teplo, které projde stěnou i to které je vytvořené kamerou uvnitř boxu. Konstrukční zpracování je navrženo do prostředí s nejvyšší teplotou 100-110°C. V případě takto vysoké teploty je teplota uvnitř boxu 40-50°C. Takovým extrémním situacím je kamera vystavena na krátké časové úseky. Běžně se bude pohybovat v prostředí s teplotou okolo 80°C, v případě takových podmínek dosáhne teplota uvnitř boxu 20-30°C. Kamera je s boxem spojena pomocí stativového upínání, přední kryt je možné velmi rychle otevřít pomocí rychloupínače. Ovládání kamery není ve velké míře omezeno, jelikož je stále realizováno pomocí volné ruky. Celková hmotnost je 3,5 kg (včetně kamery), dále nám box nabízí možnost jeho podepření levou rukou zaručující rozložení hmotnosti. To vše zaručuje dostatečnou manipulaci s boxem. Omezení pohybu je způsobeno pouze dosahem elektrického vedení. Navržené 50 m vedení však umožňuje bezpečně dosáhnout požadovaných pozic snímání.

V případě nutnosti snímání teplotních polí v prostředí s teplotou nižší než -15°C (minimální teplota použití kamery) je možné zaměnit póly vodičů Peltierova článku a využít ho v opačném režimu. Chladicí soustava se tak přemění na ohřívací a bude udržovat vyšší teplotu uvnitř boxu.

4.2. Ekonomické hodnocení

Celkové náklady na realizaci boxu jsou 81 862 Kč, vyšší cena je způsobena navrženou technologií výroby boxu, která zaručuje nízkou hmotnost celé konstrukce. Jsem přesvědčen o praktickém využití chladicího boxu, který ochrání kameru před extrémními vlivy prostředí. Vynaložené náklady tak přispějí k prodloužení životnosti kamery.

Tab. 10: *Náklady chladicího boxu*

| Položka | Cena jednotky / Kč | Množství / ks | Cena celkem / Kč |
|--------------------------------|--------------------|---------------|------------------|
| Peltierův článek | 600 | 3 | 1 800 |
| Infračervené okno | 1400 | 2 | 2800 |
| Chladič Fisher SK 48575 | 100 | 3 | 300 |
| Akasa AK – CC1101SP02 | 280 | 3 | 760 |
| Zdroj Fusion Power Supply 600W | 3 199 | 1 | 3 199 |
| Elektrické vedení | 1 306 | | 1 178 |
| Tepelný návlek + izolace | 1 025 | | 1 025 |
| Rapid Prototyping FMD | | | 70 000 |
| Katalogové komponenty | 800 | | 800 |
| Celkem | | | 81 862 |

ZÁVĚR

Bakalářská práce je věnována návrhu chladicího boxu pro termovizní kameru Flir SC 660. V souladu se zadáním byl v první kapitole proveden přehled měření teplot, se zaměřením na bezkontaktní způsob. Dále je zde podrobně popsáno termovizní snímání teplotních polí.

Kapitola 2. předkládá podrobnou analýzu chladicích médií. Jednotlivá média jsou reprezentována popisem základního chladicího principu a přehledem jejich výhod a nevýhod. Z rozboru jednotlivých vlastností a stanovení požadavků na chladicí médium vychází rozhodovací analýza principu chlazení boxu. Dále zde byla použita rozhodovací analýza pro výběr ovládání kamery. Podobnému rozboru byl podroben i výběr infračerveného průzoru krytu.

Samotnému konstrukčnímu návrhu chladicího boxu je věnována kapitola 3. Zde je uveden zevrubný popis konstrukce boxu, na který navazuje podrobnější popis jednotlivých komponent boxu. Úvodní část je věnována rozboru Peltierova článku, v které je dále uveden návrh chladicích režimů článku. Dalšími nedílnými součástmi boxu jsou chladiče, větráky či zdroj elektrické energie. Dílčí výkresová dokumentace je uvedena v příloze bakalářské práce.

Na závěr bylo provedeno technické hodnocení návrhu, které dále uvádí možnosti jeho použití. Jsem přesvědčen, že práce bude vhodným podkladem pro praktickou realizaci chladicího boxu termovizní kamery.

PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] UHROVÁ, Helena. (nedatováno). *Ústav fyziky a měřicí techniky, Učební pomůcky, Skripta*
Získáno 20. Zář 2009, z Vysoká škola Chemicko technologická:
<http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/uhrovah/skripta/Uloha%2015.pdf>
- [2] *Czech Design, Infračervené záření známe 203 let.* (22. září 2003). Získáno 10. září 2009, z
Czech Design: <http://www.czechdesign.cz/index.php?status=c&clanek=85&lang=1>
- [3] *Diagnostika staveb.* (nedatováno). Získáno 7. září 2009, z AtelierDek, Diagnostika staveb:
<http://diagnostikastaveb.cz/nabidka-sluzeb/termovize-teorie-praxe-4>
- [4] *Ruční bezkontaktní měření, TSI System.* (nedatováno). Získáno 8. Zář 2009, z TSI System:
<http://www.tsisystem.cz/produkty/rucni-bezkontaktni-teplomery--202>
- [5] GRUNER, Klaus - Dieter. (nedatováno). *Princip bezdotykového měření teploty.* Získáno 20.
září 2009, z QTest měřicí a přístrojová technika:
<http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
- [6] Uživatelská příručka FLIR 660 Series. (30. Červen 2008).
- [7] VOJÁČEK, A. (nedatováno). *Princip termografického měření.* Získáno 11. 10 2009, z
Termokamera.cz:
http://www.termokamera.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=4&Itemid=9
- [8] KREIDL, Marcel (2005). *MĚŘENÍ TEPLoty - senzory a měřicí odvody*, Praha:
BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-145-4.
- [9] Kolektiv autorů. (nedatováno). *Bezdotykové měření teploty.*
Zpravodaj pro měření a regulaci č1. a č. 2 .
- [10] VAVRIČKA, Roman (květen 2007). *Proudové a teplotní pole u deskových otopných těles*
Získáno leden 2010, z Fakulta strojní, České vysoké učení technické:
http://www.fsid.cvut.cz/~vavrirom/Disertace%20Teze/Teze_Vavricka.pdf
- [11] *MiDiag - Termovize.* (nedatováno). Získáno září 2009, z MiDiag termovize:
<http://www.midiag.cz/midiag-termovize.html>
- [12] VAVRIČKA, Roman. (nedatováno). *Bezdotykové měření teplot.* Získáno leden 2010,
z Ústav techniky prostředí, Fakulta strojní, České vysoké učení technické:
www.utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/104.pdf
- [13] *Data Sheet Flir SC660.* (nedatováno). Získáno Leden 2010, z www.flir.com.hk:
http://www.flir.com.hk/Brochures/SC660_Datasheet_11Dec.pdf
- [14] FUKÁTKO, Jaroslav. (2006). *Teplo a chlazení v elektronice 2*, Praha:
BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-199-3.
- [15] SAZIMA, Miroslav. (1989). *Teplo*, Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury,
ISBN 80-03-00043-2.
- [16] Sborník přednášek, (1988). *O metodách chlazení v elektronice.* Pardubice:
Dům techniky ČSVTS.
- [17] *Thermo-Electrci Air Conditioners .* (nedatováno). Získáno Květen 2010, z [Elen enclosures](http://www.sarel.co.za/thermoaircon.htm):
<http://www.sarel.co.za/thermoaircon.htm>

- [18] KUBINA, Pavel. (Květen 2005). *Regulace teploty pomocí Peltierových termoelektrických modulů*. Získáno Leden 2010, z Odborné časopisy:
http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30765
- [19] KOTLÍK, Václav. (1. Únor 2007). *Heat Pipe: princip a konstrukce*. Získáno Leden 2010, z Svět hardware:
http://www.svethardware.cz/art_doc-65D63DE45D7F238AC125726C0070D361.html
- [20] Kolektiv autorů, (nedatováno). *Principy chlazení*. Získáno březen 2010, z Autoledničky.cz:
<http://www.autolednický.cz/scripts/zbozi.php?KID=75>, <http://oei.fme.vutbr.cz/absorpce/>
- [21] *Suchý led*. (nedatováno). Získáno Únor 2010, z Linde-gas: <http://www.linde-gas.cz>
- [22] *Materiálové vlastnosti*. (nedatováno). Získáno Leden 2010, z Korth:
<http://korth.de/eng/503728952d091450d/index.htm>
- [23] *Produkty - materiály*. (nedatováno). Získáno Prosinec 2009, z Crystran UV - Visible - IR Specialist Optics: <http://www.crystran.co.uk/materials-data.htm>
- [24] *Peltierovy moduly řady AL*. (nedatováno). Získáno Duben 2010, z Conbrio:
<http://www.conbrio.cz/>
- [25] *Fischer elektronik Heatsinks*. (nedatováno). Získáno Květen 2010, z Heatsinks:
<http://www.fischerelektronik.de/index.php?id=61&L=1>
- [26] *CPU Coolers – AK- CC1101SP02*. (nedatováno). Získáno Květen 2010, z Akasa:
http://www.akasa.com.tw/update.php?tpl=product/cpu.list.tpl&type=CPU%20coolers&type_sub=Low%20Profile
- [27] *Rapid Prototyping*. (nedatováno). Získáno Květen 2010, z Katedra výrobních systémů Technické univerzity v Liberci : <http://www.kvs.tul.cz/>
- [28] *Rapid Prototyping*. (nedatováno). Získáno Květen 2010, z Evektor
<http://www.evektor.cz/vyvoj-a-konstrukce/rapid-prototyping-specifikace.asp>
- [29] *Stabilizované zdroje*. (nedatováno). Získáno Květen 2010, z ASTRA The fine art of modeling <http://www.astramodel.cz/index.php>